

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HÍDRICA

Ana Júlia Marques Moreira Rocha

**Análise de sensibilidade dos parâmetros reológicos em
software bidimensional para estudos de ruptura de
barragem de rejeito**

**Itajubá
2025**

Ana Júlia Marques Moreira Rocha

Análise de sensibilidade dos parâmetros reológicos em software bidimensional para estudos de ruptura de barragem de rejeito

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Profissional em Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Hídrica.

Área de concentração: Gestão de Sistemas Hídricos.

Linha de pesquisa: Recursos Hídricos Aplicados

Orientadora: Profa. Adinele Gomes Guimarães

Itajubá

2025

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	JUSTIFICATIVA.....	13
3.	OBJETIVOS.....	14
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
4.1.	Barragens de rejeitos no Brasil e no mundo.....	16
4.2.	Rupturas de barragens de rejeitos.....	21
4.3.	Rompimento por liquefação.....	26
4.4.	Características dos rejeitos de mineração.....	27
4.5.	Dinâmica do escoamento dos rejeitos.....	30
4.6.	Reologia.....	35
4.6.1.	Conceito de tensão de escoamento e viscosidade.....	37
4.6.2.	Modelos reológicos clássicos.....	38
4.7.	Modelo Numérico – RiverFlow 2D.....	41
4.7.1.	Formulações reológicas adotadas no RiverFlow 2D.....	42
4.8.	Coefficiente de <i>Manning</i>	44
5.	METODOLOGIA.....	49
5.1.	Modelo Digital de Elevação.....	50
5.2.	Características Gerais do Vale a Jusante.....	52
5.3.	Características da Estrutura Hipotética.....	52
5.3.1.	Curva Cota x Área x Volume.....	56
5.4.	Modelo Matemático Computacional.....	59
5.5.	Estudo de convergência de malha.....	61
5.6.	Parâmetros de Resistência.....	62
5.7.	Condições de Contorno.....	64
5.8.	Caracterização Reológica do Rejeito.....	65
5.9.	Cenários Analisados.....	69
5.10.	Equação Reológica.....	71
6.	RESULTADOS.....	72
6.1.	Resultado do estudo de convergência de malha.....	74
6.2.	Análise da Propagação do Escoamento através dos Hidrogramas.....	78
6.3.	Tempos de Chegada da Frente da Onda e da Onda Máxima.....	84
6.4.	Análise das Velocidades Máximas de Escoamento.....	90

6.5.	Análise das Profundidades Máximas de Escoamento	96
6.6.	Análise das Manchas de Inundação para os Cenários Analisados	103
6.6.1.	Mapas de Inundação	106
7.	CONCLUSÃO.....	111
	REFERÊNCIAS	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Quantitativo quanto ao DPA das barragens no Brasil.....	17
Figura 4.2 – Quantitativo quanto ao nível de emergência das barragens no Brasil	18
Figura 4.3 – Distribuição das barragens de mineração no Brasil	19
Figura 4.4 – Método construtivo das barragens no Brasil.....	20
Figura 4.5 – Mapa das barragens de rejeitos ativas.....	21
Figura 4.6 – Falhas de barragens ao entre os séculos 1910s e 2000s.....	22
Figura 4.7 – Falhas de barragens pelo método construtivo nos últimos 70 anos	23
Figura 4.8 – Causa das rupturas de barragens de rejeito de 1915 a 2016.....	24
Figura 4.9 – Falhas em barragens de rejeitos registradas entre 1940 e 2020	25
Figura 4.10 – Croqui exemplificando possíveis rompimentos em uma estrutura alteada a montante	27
Figura 4.11 – Exemplo de produção média de resíduos da mineração de bauxita.....	29
Figura 4.12 – Tipos de fluxo em função do teor de sólidos em massa e volume.....	33
Figura 4.13 – Sequência esquemática das etapas de evolução dos rejeitos em caso hipotético de ruptura de barragem. Fonte: Sakano (2022).	34
Figura 4.14 – Classificação dos fluidos a partir do comportamento reológico	36
Figura 4.15 – Cisalhamento entre dois planos paralelos	37
Figura 4.16 – Comportamento reológico dos fluidos.....	39
Figura 5.1 – Modelo digital de elevação (MDE) da área em estudo.....	51
Figura 5.2 – Mapa de elevações da área em estudo.....	51
Figura 5.3 – Vale a jusante da barragem hipotética a jusante	52
Figura 5.4 – Planta da barragem hipotética em estudo.....	54
Figura 5.5 – Perfil da barragem hipotética em estudo.....	55
Figura 5.6 – Croqui para o cálculo do volume por superfícies planas	56
Figura 5.7 – Planta e perfil da barragem hipotética em estudo	57
Figura 5.8 – Malha computacional.....	60
Figura 5.9 – Localização das seções analisadas.	60
Figura 5.10 – Mapa de uso e ocupação do solo.....	63
Figura 5.11 – Croqui da condição inicial e pós ruptura da barragem hipotética.....	65
Figura 5.12 – Fluxograma dos ensaios reológicos	66
Figura 5.13 – Reograma da Amostra 1	67
Figura 5.14 – Reograma da Amostra 2.....	67

Figura 5.15 – Relação exponencial entre tensão de escoamento e concentração volumétrica das amostras.....	69
Figura 5.16 – Relação exponencial entre viscosidade e concentração volumétrica das amostras	70
Figura 6.1 – Curva de risco hidrodinâmico	73
Figura 6.2 – Relação entre o tamanho da malha e o tamanho do arquivo resultante	75
Figura 6.3 – Relação entre o tamanho da malha e o tempo de processamento	75
Figura 6.4 – Relação entre o tamanho da malha e a área da mancha de inundação	76
Figura 6.5 – Tempo de chegada da frente da onda em diferentes seções ao longo do curso d'água, a partir do eixo da barragem, para diversos tamanhos de malha.....	77
Figura 6.6 – Tempo de chegada da onda máxima em diferentes seções ao longo do curso d'água, a partir do eixo da barragem, para diversos tamanhos de malha.....	77
Figura 6.7 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 1 – 0,05 km.....	79
Figura 6.8 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 2 – 0,64 km.....	79
Figura 6.9 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 3 – 0,76 km.....	80
Figura 6.10 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 4 – 1,28 km.....	80
Figura 6.11 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 5 – 2,48 km.....	81
Figura 6.12 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 6 – 2,93 km.....	81
Figura 6.13 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 7 – 3,22 km.....	82
Figura 6.14 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 8 – 3,81 km.....	82
Figura 6.15 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 9 – 6,46 km.....	83
Figura 6.16 – Gráfico do tempo de chegada da onda – Seções 1 a 5	87
Figura 6.17 – Gráfico do tempo de chegada da onda – Seções 6 a 9	87
Figura 6.18 – Gráfico do tempo de chegada da onda de pico máxima – Seções 1 a 5.....	88
Figura 6.19 – Gráfico do tempo de chegada da onda de pico máxima – Seções 6 a 9.....	88
Figura 6.20 – Gráfico de velocidades máximas – Seções 1 a 5.....	91
Figura 6.21 – Gráfico de velocidades máximas – Seções 6 a 9.....	92
Figura 6.22 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 20%	93
Figura 6.23 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 30%	94
Figura 6.24 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 40%	94
Figura 6.25 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 50%	94
Figura 6.26 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 60%	95
Figura 6.27 – Gráfico de profundidades máximas – Seções 1 a 5.....	98

Figura 6.28 – Gráfico de profundidades máximas – Seções 6 a 9.....	98
Figura 6.29 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 20% Fonte: Próprio Autor (2024)	101
Figura 6.30 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 30% Fonte: Próprio Autor (2024)	101
Figura 6.31 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 40% Fonte: Próprio Autor (2024)	101
Figura 6.32 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 50% Fonte: Próprio Autor (2024)	102
Figura 6.33 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 60% Fonte: Próprio Autor (2024)	102
Figura 6.34 – Área da Mancha de Inundação em Função da Concentração Volumétrica e Amostra de Rejeito	104
Figura 6.35 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 20% (Amostra 1 e Amostra 2).....	107
Figura 6.36 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 30% (Amostra 1 e Amostra 2).....	107
Figura 6.37 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 40% (Amostra 1 e Amostra 2).....	108
Figura 6.38 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 50% (Amostra 1 e Amostra 2).....	108
Figura 6.39 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 60% (Amostra 1 e Amostra 2).....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Tipo de fluxo em função da concentração de sólidos.....	34
Tabela 4.2 – Formulações de resistência basal reológica usadas em RiverFlow2D MT	44
Tabela 4.3 – Valores de coeficiente de rugosidade “n” de <i>Manning</i> - método de <i>Cowan</i>	46
Tabela 4.4 – Valores de coeficiente de rugosidade “n” de <i>Manning</i> – Segundo <i>Chow</i>	47
Tabela 4.5 – Valores de coeficiente de rugosidade “n” de <i>Manning</i> – Segundo <i>Chow</i> - Continuação.....	48
Tabela 5.1 – Classificação das barragens pela dimensão	53
Tabela 5.2 – Dados de Cota x Área x Volume da barragem em estudo.....	58
Tabela 5.3 – Descrição das seções analisadas	61
Tabela 5.4 – Coeficientes de Manning (n).	64
Tabela 5.5 – Resultados reológicos das amostras.....	68
Tabela 5.6 – Características das amostras como recebida.....	68
Tabela 5.7 – Descrição dos cenários analisados.....	71
Tabela 6.1 – Relação dos resultados para cada tamanho de malha	74
Tabela 6.2 – Tempo de chegada da frente da onda	84
Tabela 6.3 – Tempo de chegada da onda de pico máxima	85
Tabela 6.4 – Resultados das velocidades máximas nas seções analisadas.....	90
Tabela 6.5 – Resultados das profundidades máximas nas seções analisadas.....	97
Tabela 6.6 – Diferença entre as áreas das manchas de inundação entra as amostras 1 e 2	104

LISTA DE SIGLAS

ANM - Agência Nacional de Mineração

CDA - Canadian Dam Association

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CR - Categoria de Risco

CSO - Center for Science in Public Participation

CV - Concentração Volumétrica

DPA - Dano Potencial Associado

ICOLD - International Commission on Large Dams

MDE - Modelo Digital de Elevação

PAEBM - Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

WRL - Water Research Laboratory

ZAS - Zona de Autossalvamento

RESUMO

O número de barragens de mineração em todo o mundo tem aumentado, como reflexo do crescimento da demanda e dos avanços tecnológicos, que por sua vez, têm gerado rejeitos com mais rapidez. O aumento do volume do rejeito exige alternativas de armazenamento, seja a céu aberto, subterrânea ou subaquática. O foco, no entanto, se dá à disposição a céu aberto, mais especificamente em reservatórios de barragem de terra. Esse tipo de estrutura passa por rigorosos controles de segurança, não obstante, dois grandes acidentes no Brasil fizeram com que esse tipo de estrutura ganhasse visibilidade e houvesse perda de confiabilidade da população que mora a jusante. As legislações brasileiras passaram por reformulações e passaram a exigir a caracterização geotécnica e reológica do rejeito armazenado, com o objetivo de elaborar planos de ação que garantam a segurança de todos os envolvidos em caso de colapso de uma barragem. As definições de quais parâmetros adotar não estão totalmente fundadas na literatura. Apesar de antiga, a reologia é um tema que passou a ser mais explorado atualmente. Diante do exposto, foram realizadas modelagens numéricas bidimensionais pelo software RiverFlow 2D para um caso de ruptura hipotética de barragem de rejeitos que atende às regras da legislação vigente. Nas modelagens, utilizou-se valores reais obtidos em ensaios de caracterização reológica de duas amostras de rejeito de minério de ferro, retiradas de um reservatório. Todos os cenários foram elaborados com dados de entrada idênticos no modelo numérico, alterando apenas os parâmetros reológicos obtidos a partir da definição da concentração volumétrica (CV). Os resultados mostraram diferenças a partir dos modelos com 30% de CV. As diferenças entre as velocidades, profundidades e tempos de chegada da onda, além das áreas de inundação, evidenciando a influência da concentração de sólidos e das propriedades reológicas na dinâmica do escoamento. Ademais, ficou evidenciada a interferência dos parâmetros reológicos entre as duas amostras nos resultados apresentados, mostrando que apenas duas amostras não foram suficientes para esse estudo. Essa constatação sugere a necessidade de se definir critérios mais detalhados para a caracterização reológica do rejeito em estudos de ruptura hipotética de barragem. Além disso, é possível observar que o tema ainda carece de mais estudos e pesquisas, tendo em vista as inúmeras incertezas, variáveis, impactos sociais e ambientais envolvidos.

Palavras-chave: Ruptura hipotética, barragem, reologia, hidrodinâmico.

ABSTRACT

The number of mining dams worldwide has increased, reflecting the growth in demand and technological advances, which in turn have led to faster tailings generation. The increase in tailings volume requires storage alternatives, whether surface, underground, or underwater disposal. The focus, however, is on surface disposal, more specifically in earth dam reservoirs. This type of structure undergoes rigorous safety controls; nevertheless, two major accidents in Brazil have brought it into the spotlight, leading to a loss of public trust among downstream communities. Brazilian legislation has been revised and now requires the geotechnical and rheological characterization of stored tailings to develop action plans that ensure the safety of all those involved in the event of a dam failure. The selection of parameters for these analyses is not yet well established in the literature. Although rheology is not a new field, it has gained more attention in recent studies. In this context, two-dimensional numerical simulations were performed using RiverFlow 2D software for a hypothetical tailings dam failure scenario that complies with current legislation. The simulations used real values obtained from rheological characterization tests of two iron ore tailings samples taken from a reservoir. All scenarios were developed using identical input data in the numerical model, modifying only the rheological parameters based on the volumetric concentration (CV). The results showed differences starting from the models with 30% CV. Variations in velocity, depth, wave arrival times, and flood extent demonstrated the impact of solids concentration and rheological properties on flow behavior. Furthermore, the influence of rheological parameters from the two samples on the results was evident, indicating that only two samples were insufficient for this study. This finding suggests the need for more detailed criteria for the rheological characterization of tailings in hypothetical dam failure studies. Additionally, further research is needed on this topic, considering the many uncertainties, variables, and social and environmental impacts involved.

Keywords: Hypothetical failure, dam, rheology, hydrodynamics.

1. INTRODUÇÃO

As rupturas recentes de barragens, principalmente de contenção de rejeitos, no Brasil têm ganhado visibilidade devido aos acidentes e aos graves impactos ambientais, mortes e perdas financeiras (ÁVILA; SAWAYA; SAYÃO; FERREIRA, 2021). Esses impactos afetam os meios físico e biótico regionais, impactos significativos da saúde física e mental das populações atingidas e desestabilização socioeconômica regional (PEREIRA; CRUZ; GUIMARÃES, 2019). Devido aos grandes impactos associados a esse tipo de acidente, vê-se a necessidade de entender com mais exatidão o comportamento destes deslocamentos de massa, como por exemplo a liquefação, a fim de executar planos efetivos que garantam a segurança de todos os envolvidos.

A liquefação é um fenômeno que ocorre em solos com características arenosos saturados, soltos e sem coesão, quando submetidos a cargas suficientemente rápidas, capaz de produzir um grande acréscimo das poropressões (FREIRE NETO, 2009, MORALES-ESTEBAN et al., 2024), onde a resistência ao cisalhamento é reduzida à medida que a tensão efetiva no solo se aproxima de zero (FONSECA et al., 2022). É preciso entender todas as fases relacionadas ao deslocamento de massa, que são: mobilização, transporte e deposição (SAKANO, 2022).

O comportamento do deslizamento do fluxo após o evento de ruptura da barragem, também pode ser entendido como corrida de massa, caracterizada pelo fluxo de suspensão heterogêneas (SAKANO, 2022; BASELT *et al.*, 2021). Compreender a física da separação de fases entre as fases sólida e fluida, à medida que essa mistura se move para baixo é um desafio de longa data (PUDASAINI; FISCHER, 2020).

Diante desse contexto, este trabalho se dedica a observar como modelos numéricos bidimensionais se comportam a partir de dados reológicos distintos, investigando a influência da concentração de sólidos e das propriedades reológicas na dinâmica de escoamento de rejeitos de minério de ferro. Espera-se que os resultados contribuam para o aprimoramento dos modelos de ruptura hipotética de barragens, fornecendo subsídios para a gestão de riscos dessas estruturas e auxiliando na segurança da população e na proteção do meio ambiente.

2. JUSTIFICATIVA

A partir da publicação da Resolução nº 32, de maio de 2020, que alterou a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017, emitida pela Agência Nacional de Mineração (ANM), novas exigências foram estabelecidas para os estudos de barragens de mineração no Brasil. Entre essas mudanças, destacam-se a obrigatoriedade de realizar a caracterização geotécnica, físico-química e mineralógica dos materiais depositados nos reservatórios e a necessidade de elaborar mapas de inundação com base em modelos numéricos no mínimo bidimensionais (2D). No entanto, com a entrada em vigor da Resolução nº 95, em fevereiro de 2022, a Portaria nº 70.389 e outras resoluções anteriores foram revogadas, tornando a Resolução nº 95 o principal instrumento regulatório atual. Essa nova resolução consolidou as diretrizes, ajustando e simplificando os requisitos legais para a elaboração de estudos de segurança de barragens, mantendo o foco na segurança e na precisão dos modelos utilizados para prever cenários de ruptura.

A análise reológica, que trata do comportamento de materiais sob deformação e fluxo, é um tema que ainda não está completamente consolidado na literatura técnica. Isso reforça a necessidade de desenvolver a sensibilidade dos engenheiros e demais profissionais da área em relação aos parâmetros que devem ser adotados nos modelos numéricos que simulam rupturas hipotéticas de barragens. Esses parâmetros são fundamentais para a identificação dos pontos mais críticos na determinação dos dados de entrada, que influenciam diretamente a qualidade dos resultados.

Esses dados, por sua vez, são essenciais para a criação de mapas de inundação precisos, que constituem o principal instrumento para a elaboração do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). Esse plano é um documento técnico de fácil entendimento, elaborado pelo empreendedor (BRASIL, 2020), e que visa identificar as emergências potenciais associadas a uma barragem, estabelecendo as ações que devem ser tomadas em caso de crise, além de determinar os agentes a serem notificados. O objetivo final é minimizar danos materiais e, especialmente, a perda de vidas (BRASIL, 2022). Portanto, quanto mais próximo o mapa de inundação estiver da realidade, mais eficaz será o plano, garantindo a segurança das comunidades diretamente afetadas.

3. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é observar o comportamento dos modelos de ruptura de barragens, gerados pelo software FiverFlow2D, com base em diferentes informações reológicas. Dessa forma, busca-se analisar a influência dos parâmetros e as características hidráulicas das inundações resultantes de rejeitos/sedimentos liberados durante uma ruptura de barragem.

Como objetivos específicos tem-se:

- Investigar a influência de diferentes parâmetros reológicos nas modelagens de barragens, mantendo constantes todos os demais dados de entrada, como a base topográfica, a estrutura hipotética e os parâmetros de resistência;
- Identificar as características hidráulicas de cada modelagem em função dos dados reológicos adotados, analisando variáveis como a profundidade e a velocidade máxima da onda de inundação, o tempo de chegada da frente da onda, o tempo de chegada da onda máxima e a área total de abrangência da mancha de inundação.

A partir dos resultados obtidos, espera-se identificar correlações significativas entre as características hidráulicas do fluxo de rejeitos e as características reológicas do material propagado. Com isso, busca-se contribuir para a compreensão mais detalhada de como os parâmetros reológicos influenciam a propagação das ondas de inundação. Embora este estudo tenha como foco principal a modelagem numérica e a análise reológica, seus resultados podem fornecer insights úteis para o aprimoramento de práticas de segurança em barragens de mineração. Além disso, os dados obtidos poderão servir como base para futuras pesquisas e para a melhoria dos processos de simulação de cenários de ruptura, auxiliando engenheiros e outros profissionais no desenvolvimento de planos de ação mais eficazes em situações de emergência.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica desta pesquisa abrange tópicos fundamentais relacionados à segurança de barragens de rejeitos, com foco específico nas suas características, riscos de rompimento e nas técnicas de modelagem aplicadas à análise desses cenários. Inicialmente, são discutidos os aspectos gerais das barragens de rejeitos, tanto no Brasil quanto no mundo, abordando a sua importância no contexto da mineração e os desafios que apresentam para a engenharia civil e ambiental. Em seguida, são examinados casos históricos de rupturas de barragens, analisando suas causas e as consequências ambientais, sociais e econômicas.

Entre as diversas formas de falha, a liquefação se destaca como um dos mecanismos mais críticos de rompimento. A revisão também inclui uma análise aprofundada das características dos rejeitos de mineração, essenciais para compreender seu comportamento em cenários de escoamento, e a dinâmica desse escoamento, que é determinante para prever os impactos de uma ruptura.

Outro tema central desta revisão é a reologia dos rejeitos. A reologia, que trata do estudo do fluxo e deformação dos materiais, é crucial para a compreensão de como os rejeitos se comportam em situações de ruptura. Serão explorados conceitos-chave, como tensão de escoamento e viscosidade, além de modelos reológicos clássicos que servem de base para as análises numéricas.

A modelagem numérica é uma ferramenta imprescindível para prever os cenários de ruptura e os fluxos de rejeitos. Nesta pesquisa, o software RiverFlow 2D é o principal recurso utilizado, juntamente com as formulações reológicas adotadas. Por fim, serão apresentados os valores do coeficiente de Manning, um parâmetro que influencia a perda de carga do rejeito ao longo de sua propagação, impactando diretamente a simulação do escoamento em superfícies naturais e artificiais.

Ao longo desta revisão, serão analisadas as diferentes abordagens teóricas e aplicadas que fundamentam o estudo da segurança e mitigação de riscos em barragens de rejeitos. Esses conceitos formam a base para a modelagem e análise dos cenários hipotéticos simulados neste trabalho.

4.1. Barragens de rejeitos no Brasil e no mundo

Atualmente no Brasil existem 918 barragens de rejeito, essas informações são divulgadas e disponibilizadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2023) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB, 2023). De acordo com as duas instituições, dessas 918 barragens, apenas 457 delas estão inseridas na Política Nacional de Segurança das Barragens (PNSB).

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) é estabelecida pela Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que tem como objetivo garantir padrões de segurança de barragens, de forma a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, além de regulamentar, monitorar e acompanhar as ações de segurança das barragens (BRASIL, 2010).

As barragens inseridas no PNSB são classificadas de acordo com a Categoria de Risco (CR), o Dano Potencial Associado (DPA) e o volume, conforme estabelecido pelo art. 7º da Lei nº 12.334/2010, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Esses critérios são avaliados como alto, médio ou baixo. Além disso, as barragens de mineração são classificadas quanto à gestão operacional nas categorias AA, A, B, C e D, conforme o Anexo I da Lei nº 12.334/2010 e a Resolução nº 95/2022 da Agência Nacional de Mineração (ANM).

A classificação do DPA considera os danos que podem ocorrer em caso de rompimento e/ou mau funcionamento da estrutura, independentemente da probabilidade de sua ocorrência, e é ponderada de acordo com possíveis perdas de vidas humanas, além de impactos sociais, econômicos e ambientais (BRASIL, 2022).

A distribuição das barragens de rejeitos no território nacional, de acordo com a sua classificação, é apresentada na Figura 4.1.

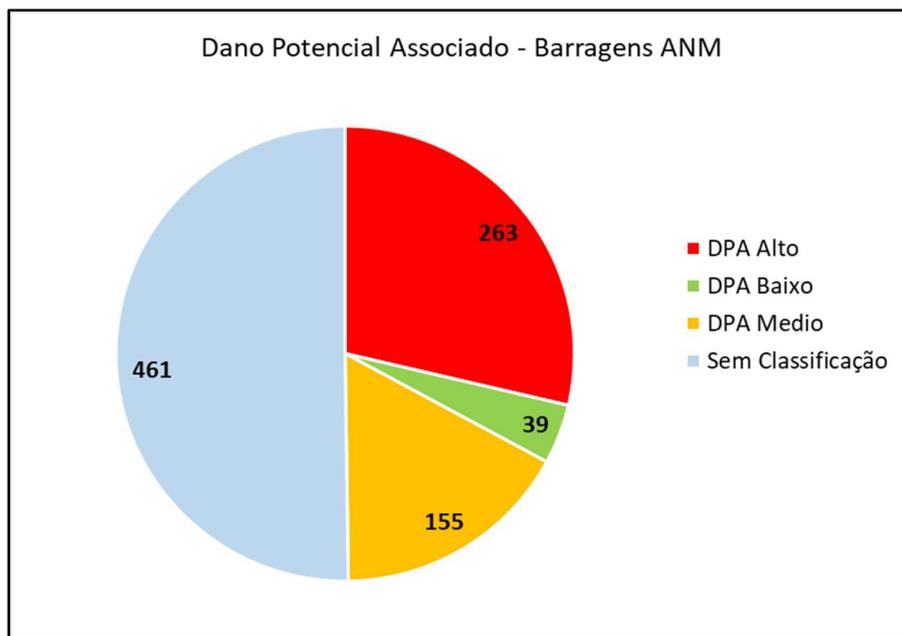


Figura 4.1 – Quantitativo quanto ao DPA das barragens no Brasil
 Fonte: Adaptado de ANM (2023) e SNISB (2023)

Considerando apenas as barragens inseridas na PNSB, verifica-se que 263 barragens estão classificadas com DPA alto (57,5%) e 155 com DPA médio (33,9%). Um dos fatores que pode ter elevado o nível de emergência das barragens foram os acidentes recentes que ocorreram no Brasil (ANM, 2023; SNISB,2023). Após o rompimento da barragem Fundação (Mariana/2015) e da barragem da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho/2019), resultaram na publicação pela ANM de uma nova resolução (Resoluções nº32 e nº 95) com diretrizes sobre como realizar um estudo de ruptura hipotética de barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM).

No Brasil, as barragens de minério de ferro representam 20,9% do total, seguida das barragens de minério de ouro, que representam 12,2% e argila, que por sua vez, representam 8,4%. Vale ressaltar que 10,3% das barragens não possuem classificação quanto ao tipo do principal minério armazenado (ANM, 2023; SNISB,2023).

Das 918 barragens cadastrada na base de dados da ANM (2023) e SNISB (2023), aproximadamente 90% não estão enquadradas em níveis de emergência e o restante possui algum grau de emergência. De acordo com Brasil (2022), os níveis de emergência são classificados em 4 níveis, sendo:

- Nível de alerta: a barragem entra nesse nível quando for detectada alguma anomalia que não coloque em risco imediato à segurança, mas que deve ser controlada e monitorada.

- Nível de emergência 1: quando a barragem estiver com categoria de risco alta, ou seja, onde ela apresenta qualquer outra situação com potencial comprometimento de segurança.
- Nível de emergência 2: a barragem entra nesse nível, quando as ações adotadas nas anomalias forem classificadas como “não controlado”.
- Nível de emergência 3: esse é o cenário mais crítico, pois a ruptura da barragem é inevitável ou já está ocorrendo.

Durante o período da pesquisa 91 barragens se enquadravam em algum tipo de nível de emergência. A distribuição das barragens de rejeitos no território nacional, de acordo com o nível de emergência em maio de 2023, é apresentada na Figura 4.2. É possível observar que três barragens estavam em nível de emergência 3, o que significa que todas as proprietárias das estruturas precisam retirar todas as pessoas inseridas dentro da Zona de Altossalvamento (ZAS).

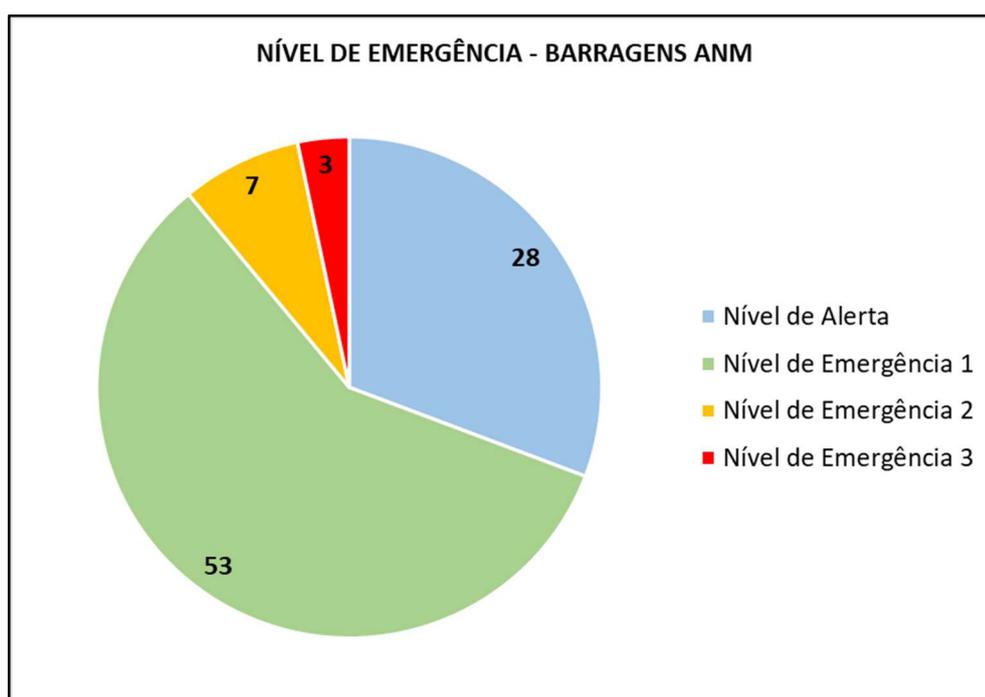


Figura 4.2 – Quantitativo quanto ao nível de emergência das barragens no Brasil
Fonte: Adaptado de ANM (2023) e SNISB (2023)

No estado de Minas Gerais estão concentradas a maior parte das barragens cadastradas na ANM (37,6 %), sejam elas inseridas ou não inseridas no PNSB, seguidos dos estados do Mato Grosso (18,0 %) e Pará (12,4 %). Os três estados juntos, representam aproximadamente 68% das barragens do Brasil e o restante (32%) estão espalhadas nos demais estados. Na Figura 4.3 são apresentadas as quantidades de barragens de mineração em todo território nacional.

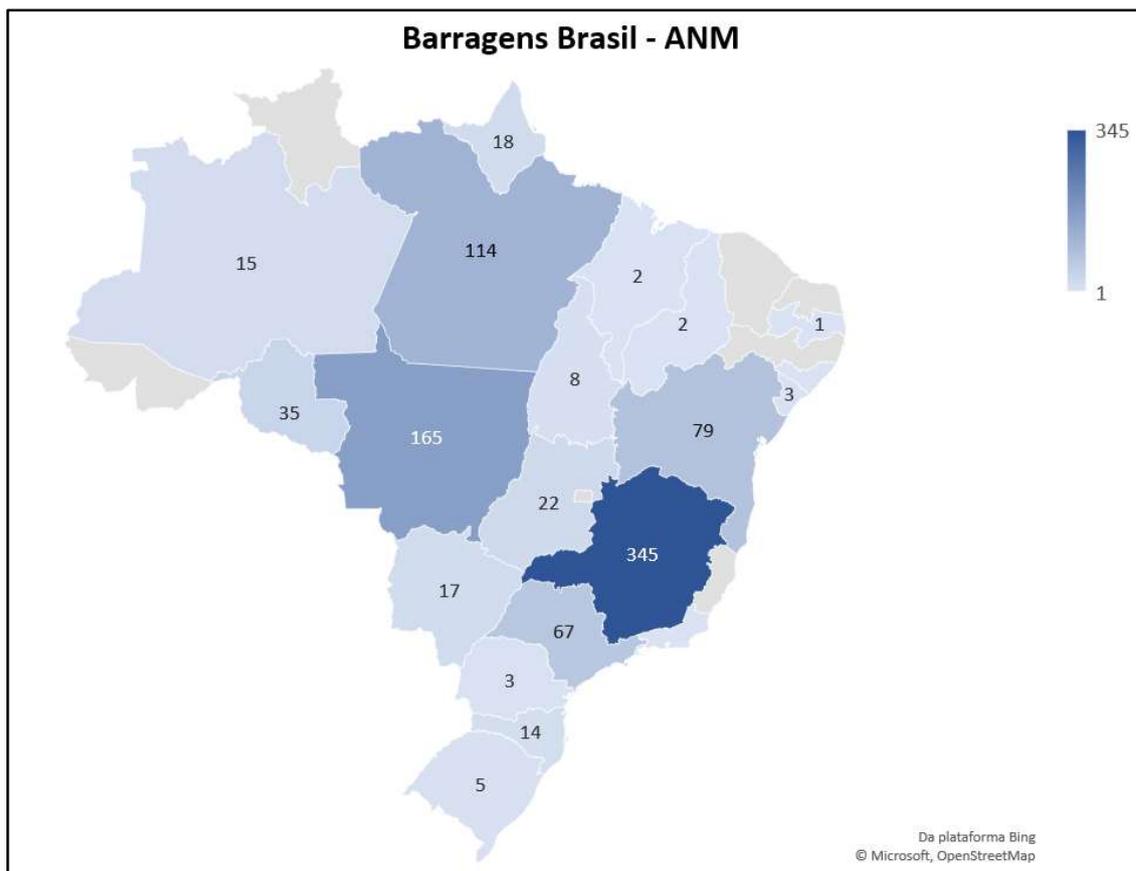


Figura 4.3 – Distribuição das barragens de mineração no Brasil
 Fonte: Adaptado de ANM (2023) e SNISB (2023)

A extração minerária é um importante setor da economia mundial, que por sua vez, cresceu de forma substancial no século XX (REIS; MOURA; COTA; MAGALHÃES JUNIOR, 2020). Existem três tipos de método de alteamento de barragem, sendo: alteamento por linha de centro, alteamento a jusante e alteamento a montante. O método de alteamento a montante é o mais adotado por apresentar baixo custo, porém, esse método construtivo apresenta mais insegurança (SILVA; RIBEIRO, 2020) e susceptibilidade a rupturas (THOMÉ; PASSINI, 2018). Ademais, desde o ano de 2001, esse método está relacionado a todos os acidentes de grande impacto envolvendo barragens de contenção de rejeito em Minas Gerais (THOMÉ; PASSINI, 2018) e, portanto, não é um método mais permitido pela legislação. Conforme descrito no §5º do Art. 1º da Resolução N° 95 de 2022.

§ 5º Fica proibida a construção ou o alteamento de barragens de mineração pelo método denominado "a montante" em todo o território nacional.

A Figura 4.4 apresenta a distribuição das barragens no Brasil quanto ao método construtivo. De posse dessas informações, mesmo pelo baixo custo executivo de alteamento a montante é possível observar que as barragens, que aumentaram a sua capacidade de armazenamento, optaram pelo método de alteamento a jusante.

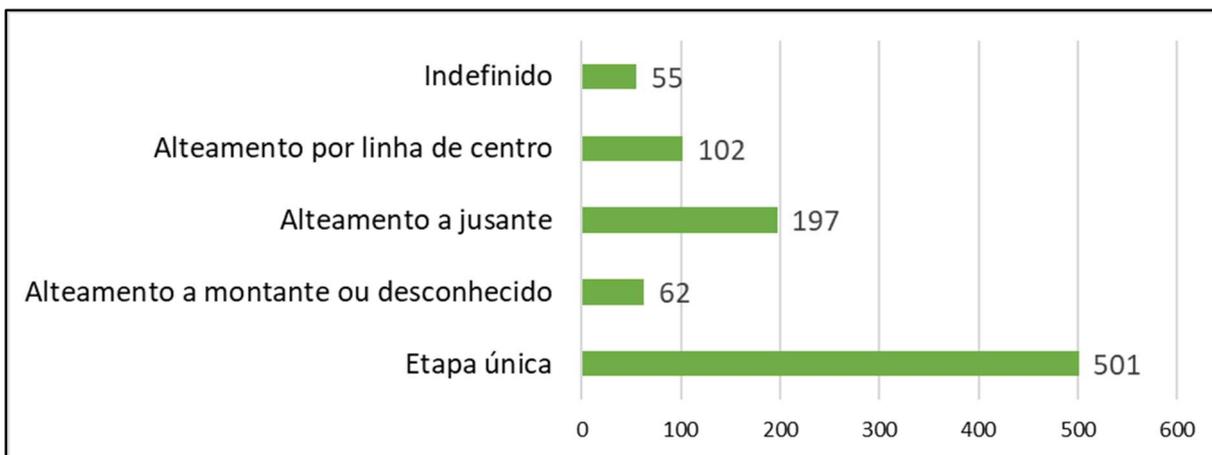


Figura 4.4 – Método construtivo das barragens no Brasil
 Fonte: Adaptado de ANM (2023) e SNISB (2023)

A *International Commission on Large Dams (ICOLD)* é uma organização internacional não governamental, que disponibiliza um fórum para troca de conhecimentos e experiências entre os profissionais e afins na área de engenharia de barragens (REIS; MOURA; COTA; MAGALHÃES JUNIOR, 2020). O site disponibiliza o panorama com o registro mundial das barragens, abrangendo todos os tipos de barragens, onde em abril de 2020 estavam cadastradas 58.713 barragens (ICOLD, 2020). Porém, faltam bancos de dados completos e não há um inventário público em nível mundial das barragens de rejeito (FRANKS *et al.*, 2021).

O crescimento da mineração no mundo trás junto a preocupação com relação à segurança, uma vez que, com a construção de barragens aumentam os riscos e os impactos sociais, ambientais e econômicos. Os colapsos e as falhas das estruturas deixam marcas negativas e perdem credibilidade do público e resultam na má reputação da indústria, que por sua vez, afetam diretamente nos cálculos dos riscos envolvidos junto às instituições financeiras (FRANKS *et al.*, 2021). Com o aumento dos riscos e dos acidentes envolvidos, cresce a responsabilidade e a cobrança dos órgãos reguladores e fiscalizadores das barragens de contenção de rejeito.

Segundo Azam e Li (2010), que avaliaram dados sobre barragens entre as décadas de 1910 e 2000, a consequência da preocupação da sociedade com relação aos acidentes envolvendo barragens, resultou na aplicação de critérios rigorosos de segurança de operação em todo mundo. Critérios esses que são observados nas atualizações constantes das legislações brasileiras, de forma a garantir a segurança da barragem e de todos os que são afetados diretamente.

No trabalho desenvolvido por Franks *et al.* (2021), foi realizado o levantamento e compilação de dados compartilhados por 107 empresas parceiras, apresentou os dados de 1.743

instalações de rejeito. Os dados contemplam informações quanto ao método construtivo, estabilidade, consequências de falha, volume armazenado e o tipo de mineral armazenado. Ademais, os autores destacam a importância das pessoas fora das empresas terem acesso a todas as informações e, assim, entender melhor os riscos a que as instalações estão expostas.

A Figura 4.5 apresenta a distribuição das barragens de rejeitos ativas no mundo (verde) e as que estão ativas e apresentam problemas de estabilidade (preto). O mapa consegue ilustrar de forma ampla a representação geográfica das instalações pesquisadas, assim como, uma sub-representação das instalações em alguns países como China, Índia e Chile, onde não foi possível adquirir informações (FRANKS *et al.*, 2021).

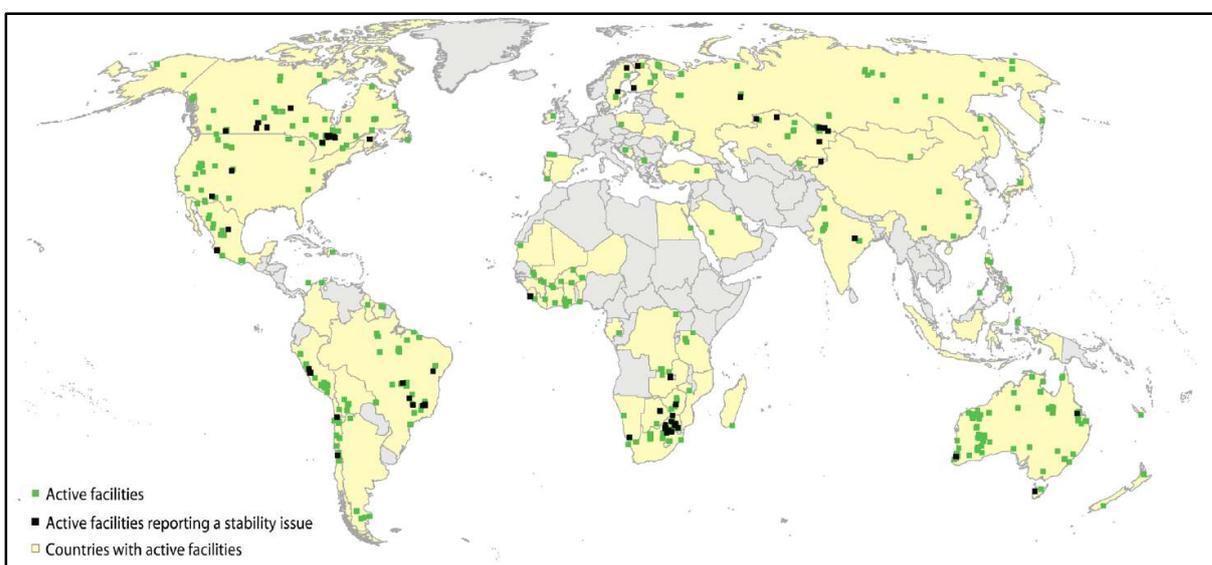


Figura 4.5 – Mapa das barragens de rejeitos ativas
Fonte: Franks *et al.* (2021)

4.2. Rupturas de barragens de rejeitos

As rupturas recentes de barragens, principalmente barragens de contenção de rejeitos, no Brasil causaram graves impactos ambientais, mortes e perdas financeiras (ÁVILA; SAWAYA; SAYÃO; FERREIRA, 2021). A intensidade e a natureza muitas vezes tóxicas do material armazenado nas barragens de rejeito, significam que o rompimento e a consequente descarga no sistema fluvial, irão afetar invariavelmente a qualidade da água, a vida aquática e humana por centenas de quilômetros a jusante da estrutura (KOSSOFF *et al.*, 2014).

Os colapsos das barragens de rejeito permaneceram constantes em torno de oito a nove acidentes entre as décadas de 1940 e 1950, mas tiveram um salto significativo em torno de 50 falhas por década, entre as décadas de 1960, 1970 e 1980, isso é um reflexo do aumento

crecente das atividades minerárias após a Segunda Guerra Mundial (AZAM; LI, 2010). A Figura 4.6 mostra o número de falhas por década segundo Azam e Li (2010).

Após a década de 2000, houve uma redução no número de acidentes, porém, após a década de 2010 esses números voltaram a subir (HALABI et al., 2022). A Figura 4.7 mostra que 43% das falhas ocorreram pelo método executivo de alteamento a montante, esse método é apontando como o menos seguro e o mais suscetível a instabilidade sísmica, se comparado com o método de alteamento a jusante, pois usam em projeto o próprio rejeito como suporte da estrutura (BAKER, 2017). Assim como as barragens alteadas a montante, as barragens alteadas pela linha de centro também apresentam parte do maciço de alteamento apoiado no próprio rejeito armazenado no reservatório, o que pode aumentar o risco de ruptura em caso de instabilidade.

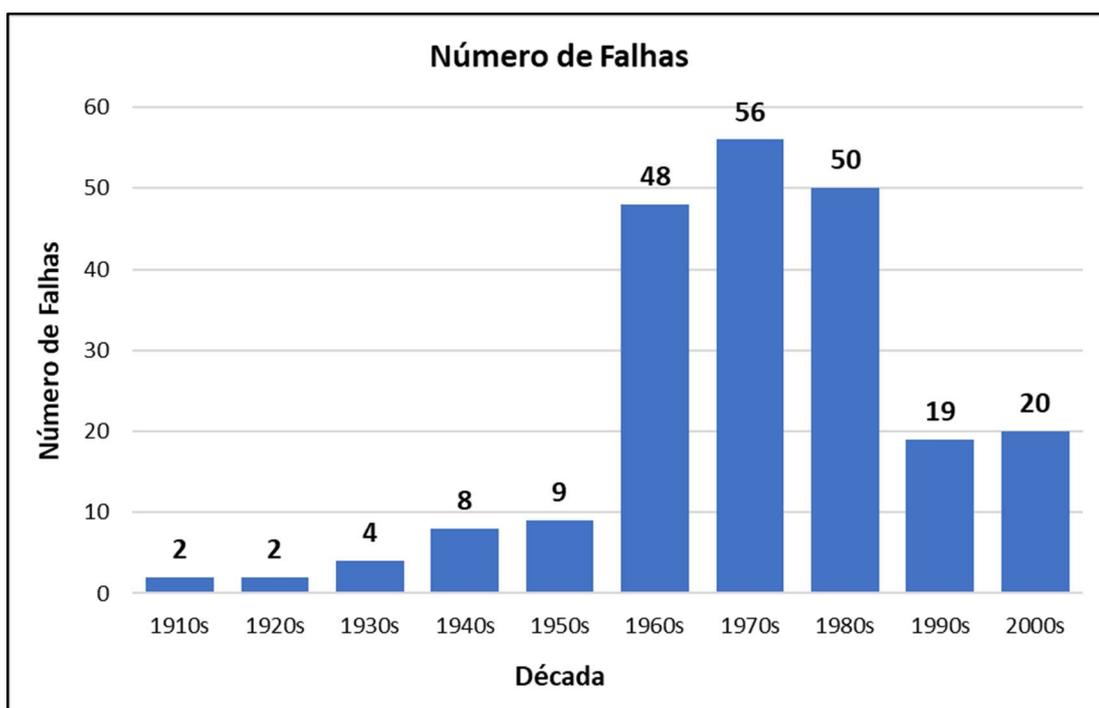


Figura 4.6 – Falhas de barragens ao entre os séculos 1910s e 2000s

Fonte: Adaptado de Azam e Li (2010)

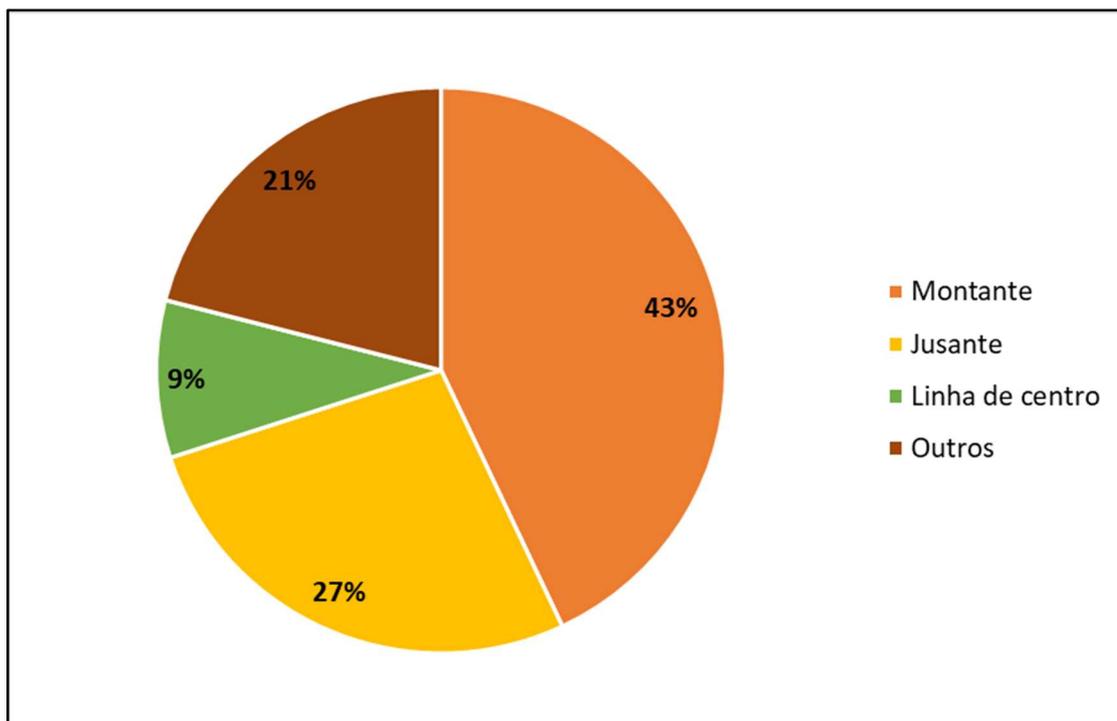


Figura 4.7 – Falhas de barragens pelo método construtivo nos últimos 70 anos
 Fonte: Adaptado de Halabi *et al.* (2022)

Vale ressaltar, que há evidências históricas de que o aumento do preço dos metais está correlacionado com a alta taxa de rompimentos de barragens de rejeito (Davies e Martin, 2009 apud KOSSOFF *et al.*, 2014).

As barragens de rejeito são mais vulneráveis ao rompimento do que as barragens de armazenamento de água (RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008). Segundo Rico, Benito e Díez-Herrero (2008), sendo algumas das seguintes particularidades: (1) aterros executados com materiais locais, como solo, estéril proveniente da operação da mina e rejeito; (2) alteamento em várias etapas de vida útil da barragem; (3) falta de regulamentação sobre critérios de projeto; (4) controle e monitoramento contínuo durante todas as fases de execução e operação da barragem e (5) alto custos durante o fechamento das atividades minerárias.

Atualmente, não existe um banco de dados mundial (completo) com todas as falhas históricas, até mesmo porque a maioria dos incidentes envolvendo barragens de rejeito não são divulgados, principalmente em países em desenvolvimento (RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008). No entanto, como destacado por Piciullo *et al.* (2022), esforços têm sido feitos para compilar dados de diversas fontes, como o *International Commission on Large Dams* (ICOLD), o *WISE Uranium Project* e o *Center for Science in Public Participation* (CSP), entre outros. Essas bases de dados, embora não sejam exaustivas, fornecem uma visão mais ampla e atualizada dos eventos de falha, permitindo análises estatísticas mais robustas sobre as

causas e consequências desses incidentes. Apesar desses avanços, a subnotificação de falhas menores e a falta de informações detalhadas sobre incidentes em países com regulamentações menos rigorosas continuam a ser desafios significativos. Cada evento de falha pode causar grandes danos ao meio ambiente, além de agregar danos econômicos, sociais, saúde pública e na perda de vidas humanas, o que reforça a necessidade de compilação e divulgação dos dados dos acidentes. A gestão de operação dos rejeitos gerados na mineração é uma questão categórica devido aos impactos irreversíveis dos rejeitos (ADIANSYAH; ROSANO; VINK; KEIR, 2015).

De acordo com os dados apresentados por Backer (2017), fica claro a influência da água nos rompimentos de barragens, uma vez que, os rompimentos por galgamento são responsáveis por aproximadamente 21% do total dos acidentes, seguidos pela instabilidade de talude (14%) e a influência de abalos sísmicos, oriundos de terremotos, que corresponde a aproximadamente 13%. Como as barragens de rejeito são executadas com materiais erodíveis, o galgamento de água pela estrutura é responsável pela erosão no talude de jusante e, conseqüentemente, o rompimento da estrutura. Ademais, aproximadamente 25% dos acidentes têm suas causas desconhecidas.

A Figura 4.8 apresenta as principais causas dos acidentes de ruptura de barragens de rejeito entre os anos de 1915 e 2016 (BAKER, 2017).

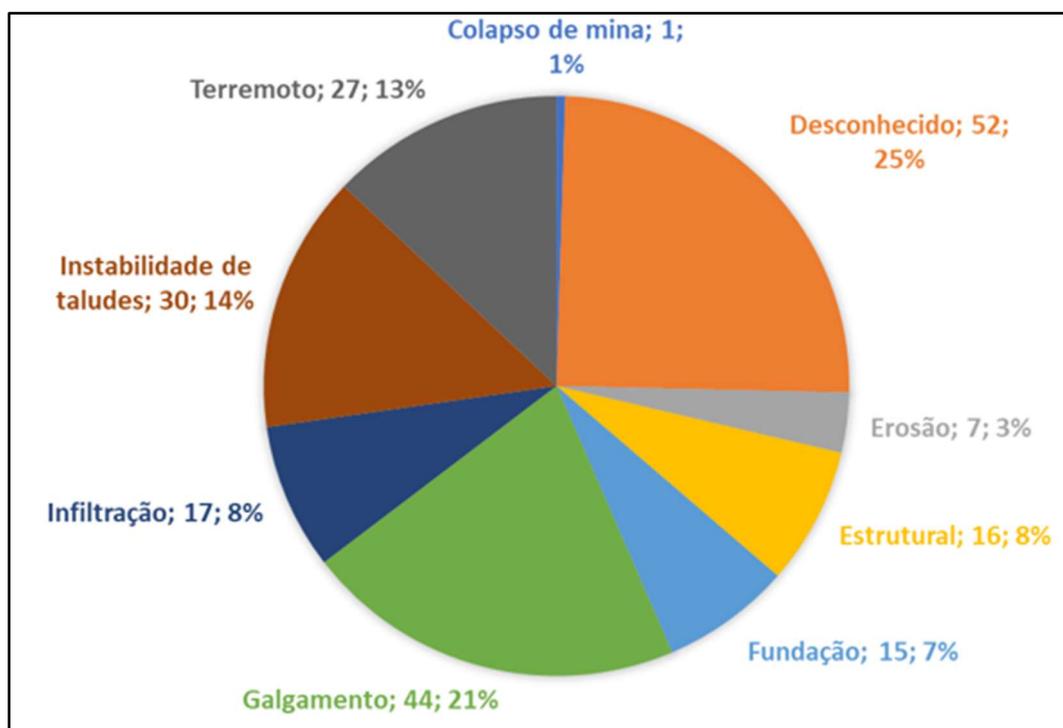


Figura 4.8 – Causa das rupturas de barragens de rejeito de 1915 a 2016
Fonte: Adaptado de Backer (2017)

As mudanças climáticas geralmente não são consideradas no projeto e execução das barragens de rejeito, porém, essas alterações têm-se mostrado relevantes e um desafio para as mineradoras e órgãos regulatórios (BAKER, 2017). Apesar do galgamento ser o maior responsável pelas rupturas de barragens, vale ressaltar que os dois últimos grandes acidentes que ocorreram no Brasil, barragem Fundão (Mariana/MG, 2015) e barragem Córrego Feijão (Brumadinho/MG, 2019), foi devido à instabilidade da estrutura, pois ambas foram alteadas pelo método a montante. O acidente da barragem Córrego Feijão foi um acidente que resultou em 272 vítimas fatais, das quais 3 vítimas ainda estão sendo procuradas pela Operação de Buscas pelo Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (ROCHA; SILVA; SILVA, 2022; AVABRUM, 2024).

Além do mapeamento dos rompimentos, é importante levar em consideração o comportamento do deslizamento do fluxo, que libera um material com energia potencial alta (HALABI *et al.*, 2022), sendo o escoamento de fluxos hiperconcentrados. Além disso, é importante ressaltar que não é em todo rompimento de barragem de rejeito que há o fluxo do rejeito liquefeito.

Segundo Halabi *et al.* (2022), foram 356 falhas de barragens, sendo que aproximadamente 23%, ou seja, 82 acidentes, apresentaram o fluxo do rejeito liquefeito. A maioria dos eventos com liquefação ocorreram no Chile (21%), essa porcentagem é consequência dos abalos sísmicos do país (HALABI *et al.*, 2022). A Figura 4.9 apresenta os acidentes entre 1940 e 2020, divididos em acidentes totais e nos quais ocorreu fluxo dos rejeitos liquefeitos.

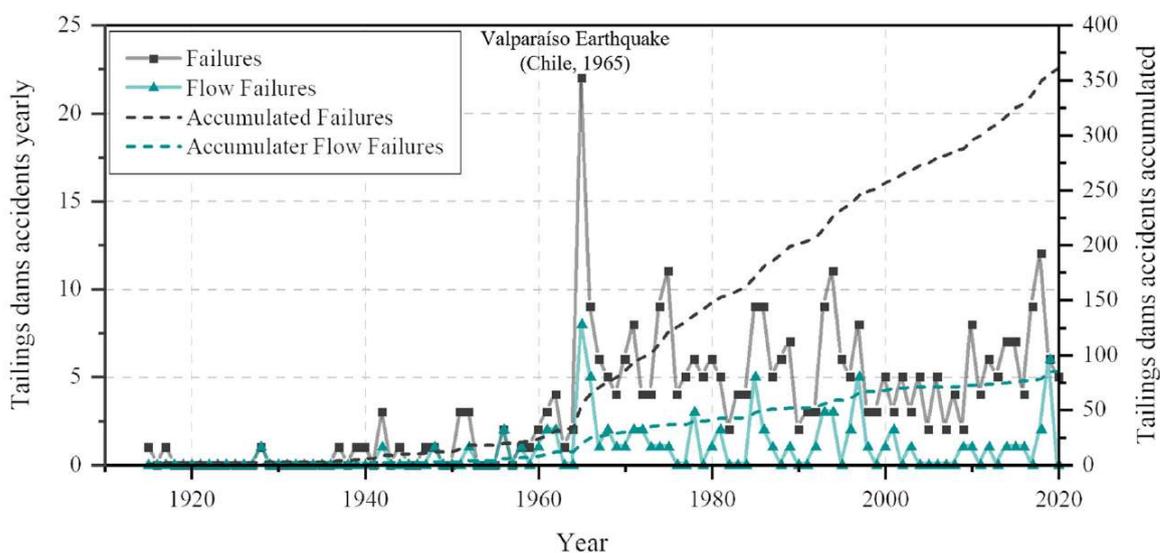


Figura 4.9 – Falhas em barragens de rejeitos registradas entre 1940 e 2020
Fonte: Halabi *et al.* (2022)

O fenômeno da liquefação é causado pela perda de tensão efetiva do rejeito/sedimento, e conseqüentemente apresenta características de um sólido que passa a ter o comportamento de um fluido, que ocorre, devido à redução da resistência ao cisalhamento e da perda de contato entre os grãos dos sólidos (SAKANO, 2022). A alta concentração de água no rejeito é uma das principais causas de falhas, dessa forma, reduzir o teor de água no rejeito disposto é a forma mais eficaz para reduzir os riscos de rompimentos de barragens e aumentar os níveis de eficiência hídrica (ADIANSYAH; ROSANO; VINK; KEIR, 2015).

4.3. Rompimento por liquefação

As falhas nas estruturas de armazenamento de rejeitos representam um risco significativo para o meio ambiente e as comunidades (FRANKS *et al.*, 2021), principalmente quando ocorre a liquefação do material. Esse tipo de falha é catastrófica e pode ser explicado, uma vez que não há sinais preliminares e a movimentação do fluxo do rejeito à jusante é rápida (COSTA *et al.*, 2023). Um exemplo significativo foi o rompimento repentino da Barragem B1, no complexo mineiro de Paraopeba (Córrego do Feijão), em Minas Gerais.

Fonseca *et al.* (2022), realizaram uma extensa campanha de amostragem e testes laboratoriais a fim de terem a caracterização geotécnica do rejeito armazenado na barragem B1. Os autores concluíram que o alteamento a montante de forma ineficiente e às más condições de drenagem, criaram uma barragem composta por rejeitos soltos, saturados, pesados e quebradiços, onde apresentavam altos valores de tensão de cisalhamento no talude de jusante, ou seja, o próprio histórico de execução da estrutura foi capaz de fornecer informações sobre as possíveis causas do rompimento.

Em uma barragem alteada a montante tanto a liquefação do rejeito armazenado quanto a liquefação do maciço podem resultar na perda de estabilidade da estrutura e seu conseqüente colapso, a Figura 4.10 ilustra os cenários supracitados.

A liquefação é um fenômeno no qual o solo saturado perde sua estrutura e passa a se comportar como um fluido denso, sem resistência ao cisalhamento. Esse processo ocorre devido ao aumento da pressão de poros, reduzindo a tensão efetiva do solo e comprometendo sua estabilidade (LIU; LIU; ZHAO, 2025).

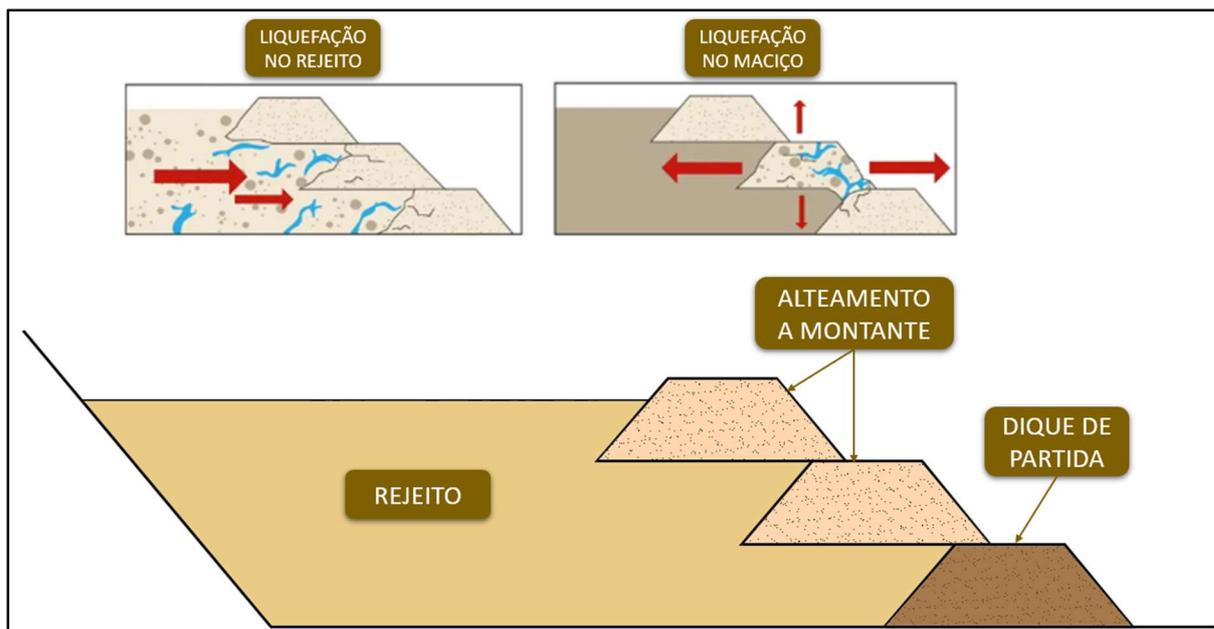


Figura 4.10 – Croqui exemplificando possíveis rompimentos em uma estrutura alteada a montante
 Fonte: Adaptado (MELO, 2019)

Segundo Fonseca et al. (2022) a caracterização correta do pico de resistência do material não drenado é de extrema importância, pois sinaliza o início da sua instabilidade e identifica a incapacidade do solo de sustentar uma determinada carga ou tensão. Se a poropressão aumenta o suficiente para reduzir a resistência ao cisalhamento a zero, o solo não é mais capaz de suportar o que está acima dele (camadas de solo, edifício, diques etc.), passando a se comportar como um líquido viscoso (MORALES-ESTEBAN *et al.*, 2024).

A possibilidade de liquefação do solo depende principalmente de dois aspectos: a resistência do solo à carga recorrente e a ação sísmica indicada em projeto. A avaliação dos efeitos sísmicos pode ser realizada adotando-se valores de referência encontrados nas legislações e literaturas, ou mesmo por análise de resposta do solo do local de interesse (RAMOS *et al.*, 2021).

4.4. Características dos rejeitos de mineração

Rejeitos são a mistura de rocha britada e fluidos provenientes do processamento de extração de metais econômicos, minerais, combustíveis minerais ou carvão (KOSSOFF *et al.*, 2014). De acordo com Adiansyah, Rosano, Vink e Keir (2015), no processo de extração minerária são produzidos dois tipos de produtos, os produtos econômicos e os não econômicos, os produtos sem interesse econômico são conhecidos como rejeitos de mineração.

Segundo dados operacionais de mineração, estima-se que o volume de rejeitos gerados é de aproximadamente 97% a 99% no minério total processado (ADIANSYAH; ROSANO; VINK; KEIR, 2015). O volume de rejeito produzido é na mesma ordem de grandeza dos processos geológicos fundamentais da formação da Terra (KOSSOFF *et al.*, 2014), ademais, a proporção de rejeitos para concentrado é geralmente muito alta, em torno de 200:1 (Lottermoser, 2007 apud KOSSOFF *et al.*, 2014).

Ainda, segundo Adiansyah, Rosano, Vink e Keir (2015), existem duas estratégias normalmente aplicadas pelas mineradoras na disposição de rejeito: disposição direta e indireta. A disposição direta é o lançamento do rejeito diretamente nos cursos d'água, oceanos e lagos. Este método gerou impactos ambientais irreversíveis e prejudiciais, portanto, esse sistema de disposição não é mais aplicado, exceto em quatro minas em todo o mundo (ADIANSYAH; ROSANO; VINK; KEIR, 2015). A disposição indireta, diz respeito à disposição dos rejeitos em reservatórios, pilhas ou barragens. Nesse cenário o rejeito pode ser disposto em rejeito convencional, em pasta, espessado e torta (ADIANSYAH; ROSANO; VINK; KEIR, 2015). Os rejeitos armazenados em reservatório, geralmente, ficam sob água, a fim de evitar a formação de poeiras superficiais e de drenagem ácida da mina, que é proveniente da oxidação do material (KOSSOFF *et al.*, 2014).

A produção anual de resíduos de mineração estimada, incluindo água, estéril e rejeitos, é de aproximadamente 20 a 25 bilhões de toneladas, sendo de 7 a 14 bilhões de toneladas oriundos dos rejeitos de mineração (Lottermoser, 2010 apud SAKANO, 2022).

Ao longo do tempo a produção muda de fácil e barata no início da vida do recurso para difícil e cara conforme o tempo avança e os recursos vão reduzindo (MASON *et al.*, 2011). Como resultado na melhoria na eficiência do processamento de extração, observa-se que o trabalho de minérios de baixo teor de sólidos ficaram mais econômicos, o que aumenta ainda mais o volume rejeito, sendo que a mineração de metais preciosos resulta em volumes de rejeitos ainda mais altas (KOSSOFF *et al.*, 2014). Na Figura 4.11 apresenta um exemplo de produção média de resíduo na extração de bauxita, cobre e ouro.

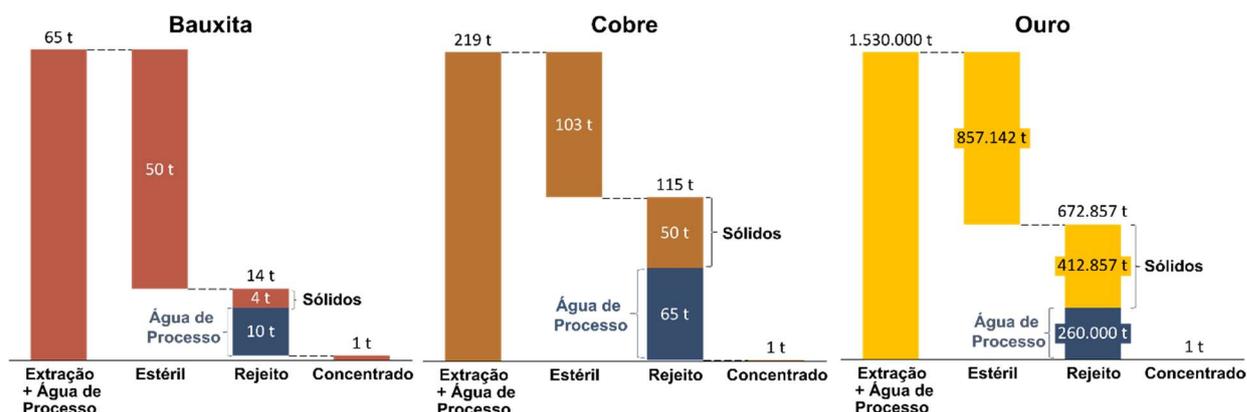


Figura 4.11 – Exemplo de produção média de resíduos da mineração de bauxita.

Fonte: Sakano (2022)

De acordo com os dados compilados e apresentado por Sakano (2022), para obter 1 tonelada de concentrado de bauxita são necessárias 55 toneladas de material extraído, sendo que 50 toneladas correspondem ao estéril e 4 toneladas se transformam em rejeitos, com 10 toneladas de água de processo, ou seja, apenas 1,8% correspondem ao concentrado de bauxita. Para se obter 1 tonelada de concentrado de cobre, são necessárias 154 toneladas de matéria-prima, sendo 103 toneladas referentes ao estéril e 50 toneladas se transformam em rejeitos, além de utilizar 65 toneladas de água de processo, ou seja, apenas 0,65% correspondem ao concentrado de cobre. O pior cenário apresentado é com relação à extração de metais preciosos, como ouro e prata, onde são necessárias 1.270.000 toneladas de material extraído para se obter 1 tonelada de concentrado de ouro, gerando assim, 857.142 toneladas de estéril e 412.857 toneladas de rejeitos, além de consumir 260.000 toneladas de água para o beneficiamento. Como pode ser observado a extração de metais preciosos é o processo que mais gera rejeito.

As propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos rejeitos dependem das propriedades químicas e mineralógicas da rocha-mãe, geoquímica, do tamanho das partículas do material e das etapas do processamento envolvido na extração do metal de interesse, inclusive dos produtos químicos usados no processamento (KOSSOFF *et al.*, 2014; KIVENTERÄ *et al.*, 2020).

Com relação às propriedades físicas, as partículas de rejeitos geralmente apresentam morfologia angulares a muito angulares, que por sua vez, impõe um alto ângulo de atrito em rejeitos secos (Mulligan, 1996; Sarsby, 2000; Bjelkevik, 2005 apud KOSSOFF *et al.*, 2014). Porém, o tamanho dos grãos do rejeito é altamente variável e difícil de generalizar (KOSSOFF *et al.*, 2014). Em um ambiente fluvial, os grãos menores serão carregados mais a jusante, aumentando a planície de inundação, ou permitindo uma maior diluição do sedimento na água.

Porém, segundo Kossoff *et al.* (2014), não é possível generalizar a distribuição com relação ao tamanho das partículas, devido à alta variação dos diferentes processos de mineração.

A composição química dos rejeitos da mineralogia do corpo do minério, do processo e da eficiência de extração dos metais, além de considerar o grau de intemperismo durante armazenamento na barragem, que pode afetar sua composição química, como a chuva ácida (KOSSOFF *et al.*, 2014). O foco principal da caracterização dos rejeitos está na identificação da composição dos metais potencialmente tóxicos e os metalóides, sendo que rejeitos com metais pesados e sulfatos são normalmente classificados como resíduos perigosos (KIVENTERÄ *et al.*, 2020).

Sempre há metais e metalóides diferentes do Fe presentes nos rejeitos, pois nenhum processo de extração é 100% eficiente (KOSSOFF *et al.*, 2014). No entanto, os elementos mais abundantes são a sílica e o Fe, junto com o oxigênio, e outros elementos mais abundantes são Al, Ca, K, Mg, Mn, Na, P, Ti e S (KOSSOFF *et al.*, 2014). Alguns rejeitos de minas contêm alto teor de enxofre (KIVENTERÄ *et al.*, 2020). Quando os rejeitos não são considerados perigosos, o potencial de reaproveitamento desse rejeito, são soluções atraentes em comparação com o descarte em aterros/pilhas (KIVENTERÄ *et al.*, 2020).

A produção e o uso do minério de ferro se tornaram a base do desenvolvimento econômico da sociedade. Tendo em vista essa dependência, Mason *et al.* (2011) sugere que seja realizada uma avaliação explorando três características de um recurso: sua disponibilidade, dependência do recurso e a possibilidade de encontrar alternativas para a substituição do recurso. Essa avaliação indica a necessidade de monitoramento e avaliação contínua dos recursos de minério de ferro, como forma de identificar como os serviços minerais, atualmente fornecidos pela mineração, poderiam ser interrompidos pelos desafios apresentados nos picos das extrações minerárias.

Ademais, é observada a necessidade de planejamento, desde o processo de extração dos minérios e metais preciosos e a disposição final do rejeito. A disposição do rejeito precisa ser em locais seguros e com planejamento ecologicamente correto, considerando um prazo indeterminado e, assim, garantir a segurança da sociedade e do meio ambiente.

4.5. Dinâmica do escoamento dos rejeitos

As barragens de terra podem apresentar diferentes tipos de ruptura, por exemplo, ruptura por liquefação do rejeito, instabilidade do maciço, galgamento, *piping*, erros humanos, dentre

outros fatores, onde, uma série de fatores simultâneos são causadores da maioria dos eventos de falhas de barragens (OWEN *et al.*, 2020). Cada modo de ruptura define a dinâmica do fluxo, assim como, influencia na velocidade, tempo de chegada da frente da onda, hidrograma de pico, tempo de formação da brecha, dentre outros (SAKANO, 2022). Assim como, a quantidade de água tem uma grande influência na velocidade do fluxo e na dinâmica geral do fluxo (BASELT *et al.*, 2021).

O comportamento do deslizamento do fluxo após o evento de ruptura da barragem, também pode ser entendido como corrida e massa, caracterizada pelo fluxo de suspensão heterogêneas, sendo: avalanches de neve, fluxos de detritos, fluxos de lava e avalanches submarinas (SAKANO, 2022; BASELT *et al.*, 2021). Compreender a física da separação de fases entre as fases sólida e fluida, à medida que essa mistura se move para baixo é um desafio de longa data (PUDASAINI; FISCHER, 2020). A interação de forças sólidas e fluidas lhes dá um poder destrutivo único, pois podem ocorrer com pouco aviso (IVERSON, 1997), com fluxos em alta velocidade, grandes volumes de sedimentos mobilizados e às forças de alto impacto exercidas contra qualquer obstáculo que encontrem pelo caminho (LANZONI; GREGORETTI; STANCANELLI, 2017).

Muitos eventos identificados como deslizamento de detritos, inundações de detritos, fluxo de lama, deslizamento de terra, lamaçais e fluxos hiperconcentrados podem ser considerados como fluxo de detritos, onde as diversas nomenclaturas, são baseadas nas origens, composições e aparência dos detritos (IVERSON, 1997). A dinâmica deste tipo de escoamento é complexa e de difícil caracterização, uma vez que há influência de forças em diferentes escalas: desde forças gravitacionais até forças superficiais das partículas (IVERSON, 2015).

O fluxo de detritos é induzido pelo deslizamento de terra, onde uma falha de massa compacta de sedimentos gera um movimento descendente de uma mistura de partículas e fluidos (BASELT *et al.*, 2021). Assim como inundações de água, o fluxo de detritos consegue percorrer longas distâncias e inundar várias áreas (IVERSON, 1997), com velocidades semelhantes às inundações de água e apresentam alta turbulência (BASELT *et al.*, 2021). A dinâmica desse tipo de escoamento é afetada tanto pelas características da mistura água e sólido, quanto pelas características topográficas adjacentes, ademais, pesquisas indicaram que a água e a topografia desempenham papéis significativos nas corridas de massa (SAKANO, 2022).

Quando ocorre o movimento de massa decorrente da mistura de água e sedimento, a mistura apresenta característica fluida, semelhante a um líquido, mas eventualmente eles se transformam em depósitos quase rígidos (IVERSON, 1997).

Segundo Bowles (1985) apud Sakano (2022), O'Brien classificou o comportamento das corridas de massa para diferentes características de fluxo, que são baseadas na concentração de sólidos presente no material propagado. O CDA (*Canadian Dam Association*) também adota a mesma classificação, conforme apresentado na Figura 4.12, onde as curvas foram baseadas nas densidades específicas de 2,65 (curva vermelha), 1,80 (curva cinza) e 4,5 (curva preta). De forma complementar a Tabela 4.1 apresenta as características do deslocamento de massa baseada na concentração de sólidos.

Baselt e colaboradores (2021) realizaram um experimento em rampa inclinada com diferentes condições iniciais e de contorno. Onde, com diferentes distribuições granulométricas, teor de sólidos e diferentes rugosidades de escoamento, com o objetivo de medir as variáveis de fluxo, como profundidade, massa, densidade aparente, velocidade e formato da frente da onda. Os autores concluíram que o teor de sólidos e a rugosidade de superfície tiveram uma influência significativa na evolução do fluxo, alterando a profundidade de escoamento, velocidade e forma da frente da onda. Já o tamanho da partícula teve um efeito perceptível na forma frontal da frente da onda e na velocidade do fluxo durante o movimento no plano inclinado. Nos ensaios com superfície lisa os autores concluíram que o tipo de superfície facilitou fluxos rápidos, rasos e turbulentos. Por outro lado, experimentos com leitos rugosos mostraram velocidades relativamente baixas e comportamento de fluxo denso.

Alguns ensaios em escala de laboratório e experimentos controlados são utilizados para estudar o comportamento do material após o rompimento de barragens de rejeitos ou de corridas de massa. Porém, representar este fenômeno natural de forma assertiva é uma tarefa muito complexa, visto que a escala experimental representa apenas uma pequena fração deste fenômeno (IVERSON, 2015). Apesar dos ensaios de laboratório serem criticados devido a escalas muito pequenas, com modelos rápidos, muito idealizados ou muito restritos, seja por limites artificiais ou condições iniciais, que não conseguem capturar a complexidade dos eventos (IVERSON, 2015), os estudos mostram que experimentos de laboratório e de campo contribuem substancialmente para uma compreensão completa e quantitativa dos eventos (SEEGER; QUINTON; KUHN, 2012).

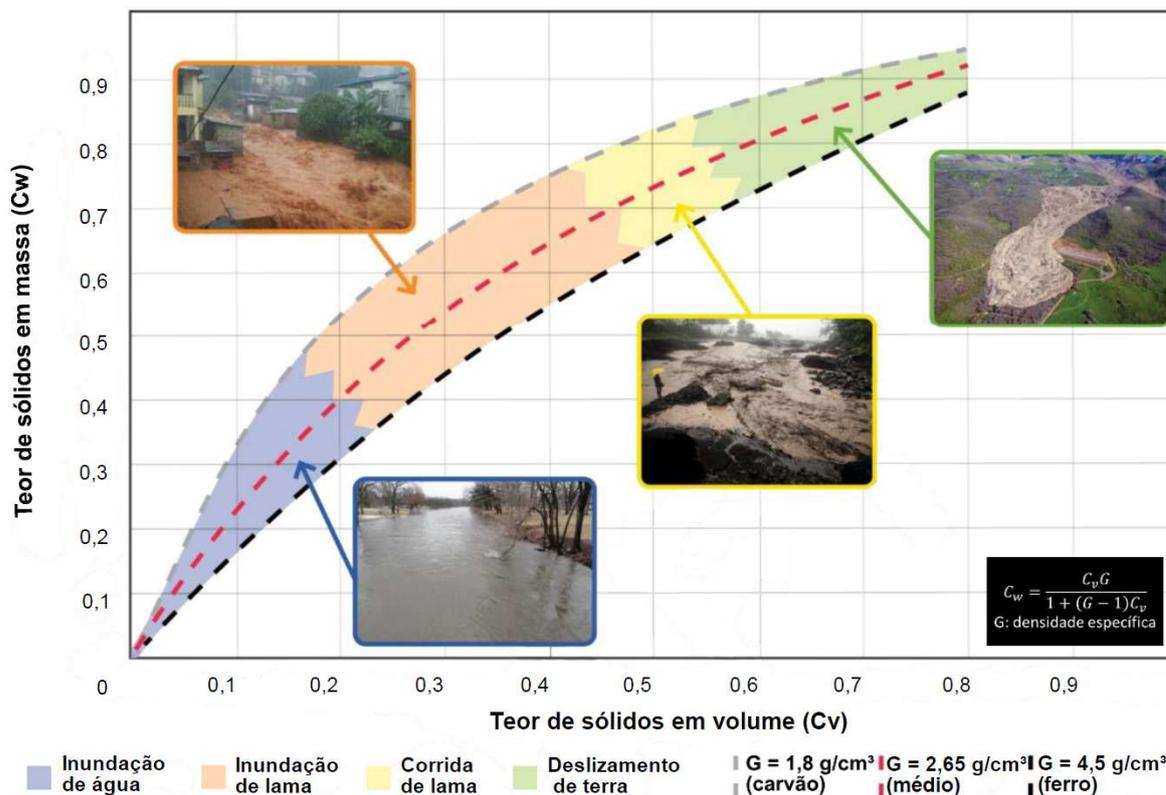


Figura 4.12 – Tipos de fluxo em função do teor de sólidos em massa e volume
Fonte: Traduzido de CDA (2020) *apud* Sakano (2022)

O processo de rompimento de uma barragem, assim como o processo pós-ruptura, ou seja, o processo de escoamento, também é complexo, tendo em vista a possibilidade de fluxo de fluidos combinados com fluxo de rejeitos, havendo ainda a possibilidade ou não da liquefação do material. Ademais, entende-se que sempre irá ocorrer três momentos envolvidos no processo de ruptura de uma barragem: mobilização, transporte e deposição (SAKANO, 2022), conforme ilustra a Figura 4.13.

- **Mobilização:** Momento inicial em que o rejeito é liberado devido à ruptura da barragem. A energia potencial do material armazenado é convertida em energia cinética.
- **Transporte:** O rejeito se desloca pelo vale a jusante, influenciado pela topografia, volume de material e características reológicas do rejeito.
- **Deposição:** O rejeito perde energia e se deposita ao longo do vale, formando uma mancha de inundação. A distribuição do material depende das condições do terreno, das características reológicas e da dinâmica do fluxo.

Tabela 4.1 – Tipo de fluxo em função da concentração de sólidos

Características do Escoamento	Concentração Volumétrica de Sólidos - C_v	Descrição
Escorregamento	0,53 a 0,90	Não há escoamento
	0,50 a 0,53	Deformações internas e movimento lento devido às tensões
Mudflow	0,48 a 0,50	Escoamento evidente, apesar de lento;
		Deformações plásticas sem espraio sobre as superfícies adjacentes.
	0,45 a 0,48	Início de espraio, apesar da atuação de forças coesivas.
Mudflood	0,40 a 0,45	Mistura-se com facilidade;
		Apresenta fluidez na deformação alastrando-se sobre superfícies horizontais;
		Durante movimento a superfície do fluido apresenta considerável declividade;
		Aparecimento de ondas com dissipação rápida.
	0,35 a 0,40	Acentuada sedimentação;
		Alastra-se quase por completo sobre superfícies horizontais;
		Identificação de duas fases (fase líquida aparece); Ondas se propagam por distâncias consideráveis.
	0,30 a 0,35	Separação de água na superfície;
		Ondas propagam-se com facilidade;
		Decantação de partículas granulares.
	0,20 a 0,30	Ação de ondas distinta;
		Superfície fluida;
Todas as partículas foram decantadas.		
Escoamento Aquoso	< 0,20	Inundação provocada por propagação de onda no estado líquido com de carga de sedimentos suspensos.

Fonte: O'Brien e Julien (1984) *apud* Melo (2013)

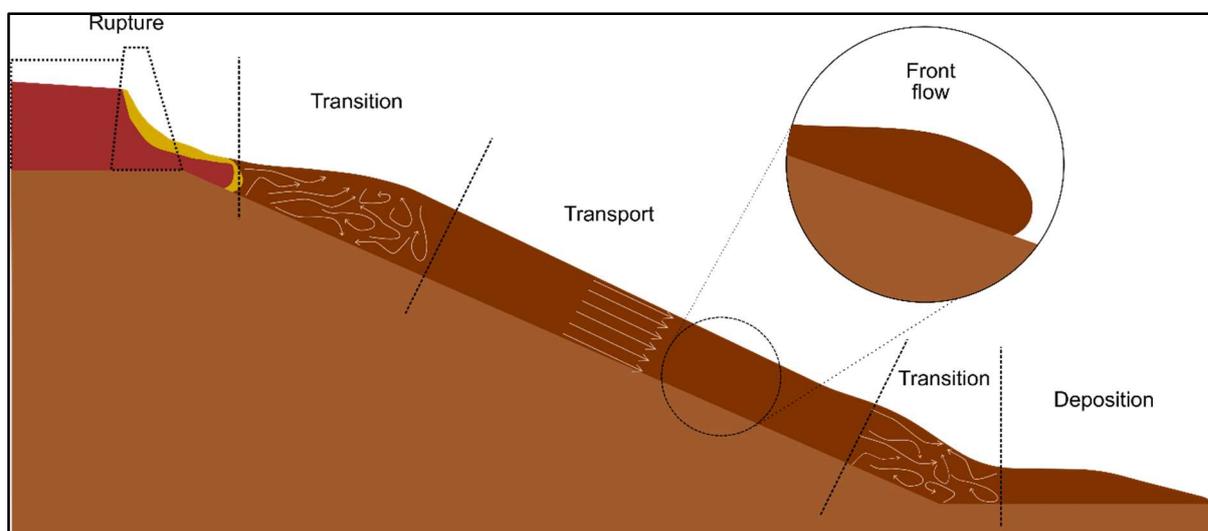


Figura 4.13 – Sequência esquemática das etapas de evolução dos rejeitos em caso hipotético de ruptura de barragem. Fonte: Sakano (2022).

4.6. Reologia

Resumidamente Schramm (2006) fala que a reologia descreve a formação de um corpo sob a influência de tensões, ou seja, quando uma força externa é exercida sobre ele conseqüentemente ele se deforma ou flui (VAN VLIET; LYKLEMA, 2005). Foi somente em 1929, com a fundação da Sociedade de Reologia, que o comportamento mecânico de alguns materiais como a borracha, o plástico, cerâmicas e tintas passou a ganhar notoriedade entre os físicos, mecânicos e matemáticos (Tanner, 1988 apud GALINDO, 2013).

Os fluidos podem ser classificados como Newtonianos e não Newtonianos. Schramm (2006) classifica o comportamento reológico de materiais relacionados com a deformação a partir de uma determinada tensão aplicada, onde inicialmente pode ser apontado como dois extremos ideais, como:

- Sólidos ideais que se deformam elasticamente. Onde a energia necessária para a deformação é completamente recuperada a partir da retirada da tensão. Materiais elásticos deformam-se instantaneamente até determinado ponto de aplicação da tensão, porém recuperam a sua forma original.
- Fluidos ideais ou viscoso, como líquidos e gases, eles fluem e a deformação é irreversível. Materiais viscosos mantem a forma que tinha no momento da remoção da tensão. A energia necessária é dissipada sob a forma de calor e mesmo após a remoção da tensão não é possível ser recuperada sua forma original.

Alguns materiais apresentam características entre os dois extremos, se comportando tanto quanto viscoso como elástico, por apresentarem essa característica, esses materiais são conhecidos como viscoelásticos (THEISEN, 2006). Materiais viscoplásticos apresentam tensão de escoamento e se comportam de forma mais parecidas com líquidos e se recuperam parcialmente após a retirada da tensão (Macosko, 1994 apud SAKANO 2022).

A Figura 4.14 detalha a classificação dos fluidos a partir da classificação entre Newtoniano e não Newtoniano.

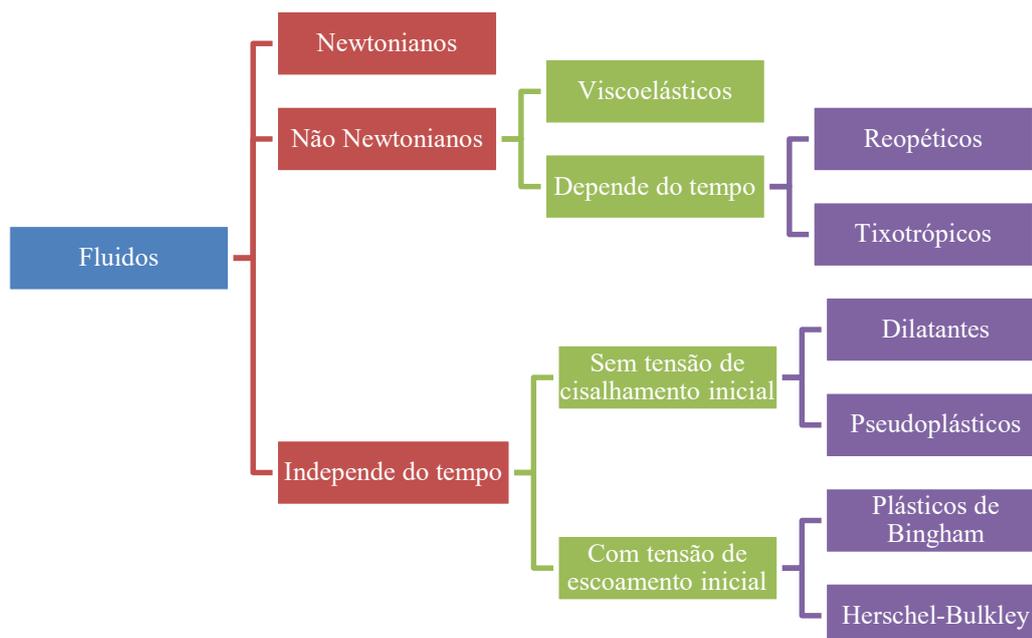


Figura 4.14 – Classificação dos fluidos a partir do comportamento reológico
 Fonte: Adaptado (COSTA, 2017)

Os fluidos Newtonianos apresentam, a uma dada temperatura, valor de viscosidade independente da variação da velocidade ou da taxa de cisalhamento, sua viscosidade é constante e linear, seguem a Lei de Newton. Os fluidos não-Newtonianos a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento não é constante, apresentam comportamento dependente, isto é, os valores de viscosidade podem aumentar ou diminuir em função do aumento da velocidade ou taxa de cisalhamento (SCHRAMM, 2006).

Os principais parâmetros reológicos são tensão de escoamento e viscosidade. A tensão de cisalhamento pode ser definida como a tensão mínima para que o escoamento se inicie, já a viscosidade é a resistência do fluido a um escoamento cisalhante, ou seja, quando o fluido é submetido a uma determinada tensão, ele pode fluir de forma rápida, onde entende-se que ele é pouco viscoso (água), ou possuir maior resistência durante seu escoamento e apresenta pouca fluidez, nesse caso, pode-se dizer que o fluido é altamente viscoso, como os óleos (COSTA, 2017).

Em materiais com características viscoplásticas a quantificação e controle dos valores de tensão de escoamento e viscosidade são mais complexos, sendo importante analisar os modelos reológicos, como ensaios que representam a transição do sólido para o líquido (SCHRAMM, 2006).

Um dado importante com relação ao escoamento é a existência de um limite de escoamento. Para alguns materiais que escoam rapidamente sob uma determinada tensão de

cisalhamento, não escoarão completamente caso a tensão aplicada for inferior ao valor do limite de escoamento (GALINDO, 2013).

4.6.1. Conceito de tensão de escoamento e viscosidade

A viscosidade de um material é a medida da resistência ou fricção interna ao fluxo quando submetida a uma tensão. Quanto mais viscosa a massa, maior será o atrito entre as camadas e, portanto, mais difícil de escoar e será mais energia dissipada (OLIVEIRA et al., 2000 apud SAKANO, 2022)

Newton definiu o parâmetro de viscosidade através de uma experiência com duas placas paralelas. Nesse modelo, o fluido contido entre duas placas planas e paralelas, de área A , separadas por uma distância infinitesimal (dy). Uma força (\vec{F}) é aplicada tangencialmente na parte superior, movimentando a placa a uma velocidade (\vec{v}) constante em relação à placa inferior, que é mantida fixa, conforme a Figura 4.15.



Figura 4.15 – Cisalhamento entre dois planos paralelos
Fonte: Adaptado de Sakano (2022)

A força \vec{F} dá origem a uma força de mesma intensidade, mas em sentido contrário, a força de cisalhamento que existe, somente devido às forças de coesão do fluido com as paredes da placa e entre as camadas de fluido, em caso de regime laminar. A força de cisalhamento dá origem a um gradiente de velocidade $\frac{dv_x}{dy}$ entre as placas (HYDRONIA, 2022).

A Lei de Newton da Viscosidade diz que a relação entre a tensão de cisalhamento (força de cisalhamento dividida pela área) e o gradiente local de velocidade é definida através de uma relação linear, sendo a constante de proporcionalidade, a viscosidade do fluido. Assim, todos os fluidos que seguem este comportamento são denominados fluidos newtonianos. A viscosidade é a constante de proporcionalidade entre a tensão (τ) aplicada sobre a lâmina e a taxa de cisalhamento, conforme a Equação 01.

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1)$$

Onde:

- τ_{xy} = tensão de cisalhamento na direção x ($g/cm.s^2$);
- μ = viscosidade ($cP = 10^{-2}g/cm.s = 0,001kg/m.s = 10^{-3} N.s$);
- $\frac{dv_x}{dy}$ = gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento (s^{-1}).

Suspensões mais diluídas, apresentam as características de fluidos newtonianos, enquanto, que suspensões mais concentradas, como os rejeitos, não apresentam linearidade entre a tensão e a taxa de cisalhamento, assim a viscosidade é em função da taxa de cisalhamento aplicada.

Alguns fluidos e suspensões para se iniciar o processo de escoamento é necessário aplicar uma tensão mínima de cisalhamento, abaixo dessas tensões mínimas o material se comporta como elástico rígido. Esse comportamento é como tensão de escoamento. Acima da tensão de escoamento os materiais exibem caráter de afinamento por cisalhamento. Sendo assim, a tensão de escoamento dos materiais corresponde a tensão necessária para romper uma estrutura tridimensional de partículas (VAN VLIET; LYKLEMA, 2005).

4.6.2. Modelos reológicos clássicos

As características de fluxo são normalmente representadas por curvas de tensão de cisalhamento (τ_{xy}) em função da taxa de cisalhamento ($\frac{dv_x}{dy}$). O comportamento dos fluidos se divide em dois grupos, os newtonianos, também conhecidos fluidos “ideais”, e os não newtonianos, onde não exibem o comportamento de um fluxo “ideal” (SCHRAMM, 2006). O comportamento newtoniano indica que a viscosidade não é influenciada pelas alterações da taxa de cisalhamento e é representada por uma reta. A grande maioria dos líquidos não apresentam essa característica de linearidade e apresentam uma tensão de escoamento, que são os líquidos não-Newtonianos.

A Figura 4.16 apresenta os comportamentos de vários tipos de comportamento de fluxo.

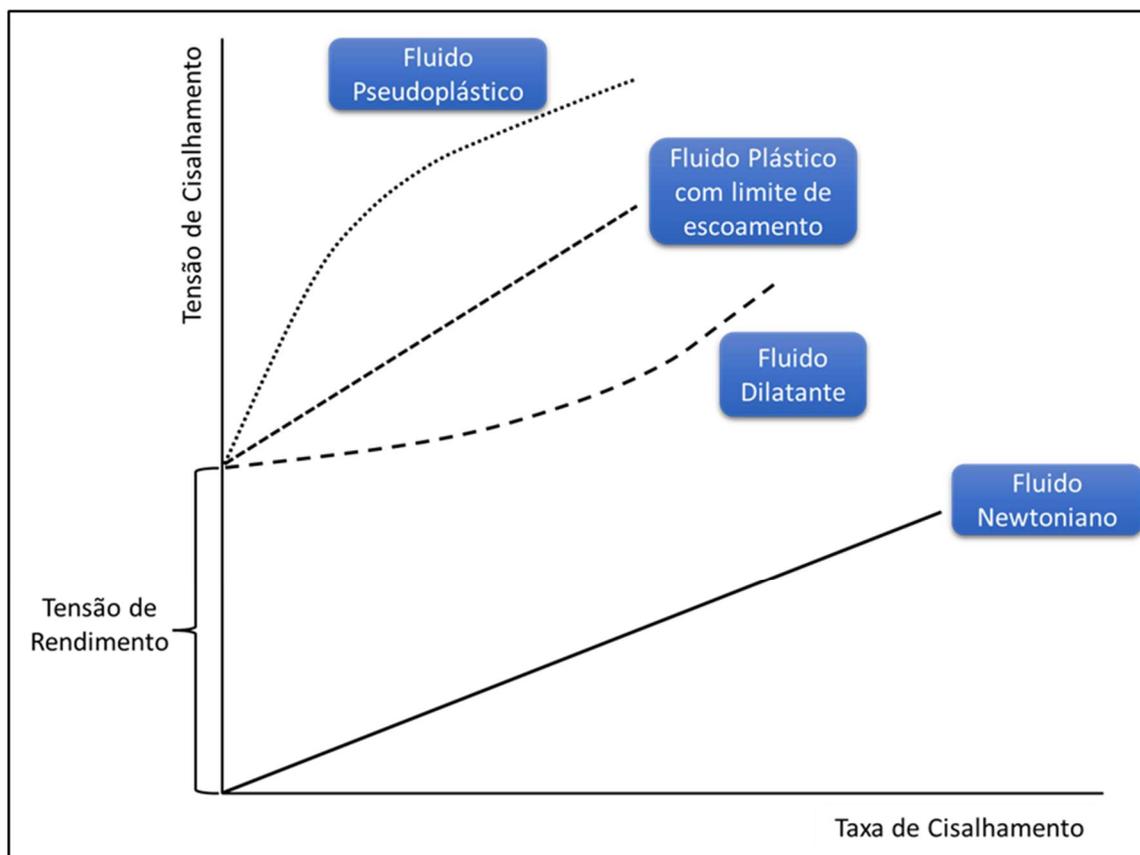


Figura 4.16 – Comportamento reológico dos fluidos
 Fonte: Fonte: Adaptado (HYDRONIA, 2022)

Os **fluidos pseudoplásticos** são substâncias que, em repouso, apresentam suas moléculas em um estado desordenado, e quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. São fluidos que sofrem uma redução de viscosidade quando ocorre o aumento da taxa de cisalhamento ($\frac{dv_x}{dy}$). E quanto maior esta força, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente (HYDRONIA, 2022; SCHRAMM, 2006). Este fluido pode ser descrito pelo Modelo de Ostwald-de-Waele ou Modelo Power Law (Equação 2), com n menor que a unidade.

$$\tau_{xy} = -K \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

Onde:

- τ_{xy} = tensão de cisalhamento;
- $\frac{dv_x}{dy}$ = taxa de cisalhamento e v_x é a componente do vetor de velocidade ao longo da coordenada x ;
- K = índice de consistência do fluido;

- n = inclinação da curva (só atinge o valor da unidade para taxas de deformação muito baixas ou muito altas, e o fluido se torna mais newtoniano).

Para a maioria dos fluidos com comportamentos de fluxo pseudoplástico o efeito do cisalhamento é reversível, os líquidos recuperam a sua alta viscosidade original quando o cisalhamento é interrompido ou reduzido.

Os **fluidos plásticos de Bingham** são descritos como líquidos pseudoplástico com limite de escoamento. Apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento (τ_{xy}) e a taxa de cisalhamento ($\frac{dv_x}{dy}$), a partir do momento em que se atinge uma tensão de cisalhamento inicial (τ_0). Este comportamento é descrito pela Equação 3:

$$\tau_{xy} = \pm\tau_0 - \mu_0 \frac{dv_x}{dy}, \text{ para } |\tau_{xy}| > |\tau_0| \quad (3)$$

Onde:

- $\frac{dv_x}{dy} = 0$, para $|\tau_{xy}| < |\tau_0|$;
- τ_0 = tensão de cisalhamento inicial;
- μ_0 = constante análoga à viscosidade de fluidos newtonianos.

O sinal positivo de τ_0 é utilizado quando τ_{xy} é positivo ou negativo, caso contrário.

Os fluidos plásticos podem ser classificados como líquido e sólido. Pois, eles se comportam como sólido até que seja exercida uma tensão necessária para que ele comece a fluir, ou seja, quando são aplicadas forças externas, fortes o suficiente para superar tensão de cisalhamento, o material entra em colapso e o sólido se torna líquido. Assim, líquidos plásticos têm curvas de fluxo no ponto crítico de τ_0 e não na origem da ordenada (HYDRONIA, 2022; SCHRAMM, 2006).

O **Herschel-Bulkle**, também chamado de Bingham generalizado, é um tipo de fluido plástico que também necessita de uma tensão inicial para começar a escoar. Entretanto, a relação entre a tensão de cisalhamento (τ_{xy}) e a taxa de cisalhamento ($\frac{dv_x}{dy}$) não é linear (Equação 4). Esta relação depende do expoente adimensional n , característico para cada fluido (HYDRONIA, 2022).

$$\tau_{xy} = \pm\tau_0 - \mu_0 \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^n, \text{ para } |\tau_{xy}| > |\tau_0| \quad (4)$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0, \text{ para } |\tau_{xy}| < |\tau_0|$$

Os **Fluidos Dilatantes** são substâncias que apresentam um aumento de viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento. No caso de suspensões, à medida que se aumenta a tensão de cisalhamento, o líquido intersticial que lubrifica a fricção entre as partículas é incapaz de preencher os espaços devido a um aumento de volume que frequentemente acompanha o fenômeno. Ocorre, então, o contato direto entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, um aumento da viscosidade aparente (HYDRONIA, 2022). A dilatância em líquidos é rara, pois ele tende a complicar as condições de produção (SCHRAMM, 2006).

4.7. Modelo Numérico – RiverFlow 2D

De acordo com o manual disponibilizado pela Hydronia (2020), o RiverFlow2D é um software de modelagem hidráulica bidimensional (2D) que simula o escoamento da água e fluidos hiperconcentrados em rios e planícies de inundação. Possui capacidade de lidar com fluxos complexos, incluindo inundações, transporte de sedimentos e contaminantes.

O software utiliza um método numérico denominado de "volumes finitos" para resolver as equações que descrevem o movimento do fluido. O modelo utiliza malhas triangulares não-estruturadas, capazes de representar satisfatoriamente a topografia do terreno, a rugosidade e as estruturas hidráulicas presentes.

O RiverFlow2D oferece grande flexibilidade na definição das condições de contorno, permitindo especificar como a água entra e sai da área de estudo delimitada. A região limitada pela malha computacional corresponde ao limite em que os cálculos da modelagem serão realizados, com base no levantamento topográfico e na área de interesse.

Como condição de contorno, é possível definir hidrogramas de vazão para representar a variação da vazão ao longo do tempo, níveis de água constantes ou variáveis, e até mesmo combinar diferentes tipos de condições de contorno em um mesmo modelo. Além disso, permite a entrada de uma superfície como uma condição de contorno de entrada. Essa flexibilidade garante que o modelo represente adequadamente as condições reais do sistema hídrico e atenda às necessidades de várias possibilidades de estudos.

O RiverFlow2D não se limita a simular apenas água. Com o módulo de fluxo de lama e detritos (MD), o software é capaz de modelar fluidos não newtonianos, como lamas, detritos e outros materiais com comportamento complexo. Para isso, o RiverFlow2D disponibiliza um conjunto de oito formulações reológicas, incluindo modelos como Bingham, Herschel-Bulkley, Voellmy e outros.

Após a simulação, o RiverFlow2D fornece uma variedade de resultados detalhados que permitem analisar o comportamento do fluxo. O usuário pode visualizar mapas de velocidades, profundidades e níveis de água, além de gerar gráficos e tabelas com informações sobre outros parâmetros hidráulicos relevantes. O software permite gerar mapas de tempos de chegada da onda para diferentes alturas. Esses resultados são essenciais para a compreensão do comportamento hidráulico durante um estudo de ruptura hipotética de barragem.

4.7.1. Formulações reológicas adotadas no RiverFlow 2D

A formulação monofásica no RiverFlow2D, no módulo de corrida de lama e escoamento de rejeitos (*Mud/Tailings Flow*), leva em consideração os diferentes termos de atrito que representam uma variedade de fluidos não newtonianos hiperconcentrados e possui diversas formulações reológicas para os escoamentos desses fluidos. Como o modelo conceitual do RiverFlow2D é calculado verticalmente, todos os termos podem coexistir e são agrupados matematicamente na mesma fórmula.

Conforme Hydronia (2022), não existe uma relação universal para representar a tensão de cisalhamento na interface do leito ao longo da direção do fluxo (τ_b) em fluxos de rejeitos e lama/detritos. A formulação selecionada para modelar o estado de tensão ao longo da coluna de fluxo incorpora nas equações de momento o comportamento reológico do fluido compressível complexo em movimento.

Diferentes tipos de tensões de cisalhamento determinam essa reologia complexa: tensão turbulenta/dispersiva (τ_t) e tensão viscosa na fase líquida (τ_μ), tensão de escoamento coesiva (τ_y) ou tensão de atrito tipo Coulomb entre grãos sólidos (τ_f).

Todos esses diferentes tipos de tensão de cisalhamento atuam simultaneamente ao longo da coluna de mistura e, portanto, participam do módulo de resistência ao fluxo na superfície do leito, que deve ser expresso em função da profundidade de fluxo (h), da densidade média na profundidade (ρ) e do módulo de velocidade ($|u| = \sqrt{u^2 + v^2}$).

No caso de um **fluido newtoniano viscoso**, a tensão de cisalhamento (τ_b) é expressa em função da velocidade média vertical (u) e da profundidade (h) como mostrado na Equação 5:

$$\tau_b = 3\tau_\mu \text{ com } \tau_\mu = u/h \quad (5)$$

Um **fluido de Bingham** não flui até que um certo valor limite de tensão, a tensão de escoamento (τ_y), seja excedida. Uma vez estabelecido o fluxo, o movimento é caracterizado

por uma viscosidade plástica da mistura. A tensão de cisalhamento no fundo (τ_b) pode ser obtida a partir da expressão cúbica apresentada na Equação 6:

$$2\tau_b^3 - 3(\tau_y + 2\tau_\mu)\tau_b^2 + \tau_y^3 = 0 \quad (6)$$

E nos casos em que a razão de tensão $\frac{\tau_y}{\tau_b}$ for menor que 0,5, ela pode ser reduzida para a Equação 7:

$$\tau_b = \frac{3}{2}\tau_y + 3\tau_\mu \quad (7)$$

Se apenas a tensão de atrito do **tipo Coulomb** for considerada, a tensão de cisalhamento inferior é dada pela Equação 8:

$$\tau_b = \tau_f = g \cdot \rho \cdot h \cdot \cos \theta \cdot \tan \theta_b \quad (8)$$

Onde:

- g = aceleração da gravidade;
- ρ = densidade média do fluido;
- h = profundidade;
- θ = ângulo de inclinação inferior;
- θ_b = ângulo de atrito do material sólido.

Além disso, se τ_b inclui apenas efeitos dispersivos e turbulentos perto do fundo, um coeficiente c_f pode ser usado (Equação 9):

$$\tau_b = \tau_f = \rho \cdot c_f \cdot u^2 \quad (9)$$

As formulações reológicas no RiverFlow2D consideram os seguintes comportamentos de fluido:

- Escoamentos Newtonianos turbulentos;
- Escoamentos viscoplásticos coesivos;
- Escoamentos por atrito/espessamento por cisalhamento;
- Escoamentos turbulentos friccionais;
- Escoamentos turbulentos coesivos.

A Tabela 4.2 apresenta o resumo dos diferentes modelos usados pelo RiverFlow2D para a estimativa da resistência basal (leis de atrito).

Tabela 4.2 – Formulações de resistência basal reológica usadas em RiverFlow2D MT

ID	Modelo	Resistência Basal	Tipo de Fluxo
1	Manning Turbulento	$\tau_b = \tau_f + \rho g \psi \frac{n^2 u ^2}{h^{1/3}}$	Newtoniano turbulento
2	Bingham Completo	$2\tau_b^3 - 3\left(\tau_y + 2\mu_B \frac{ u }{h}\right)\tau_b^2 + \tau_y^3 = 0$	Viscoplástico coesivo
3	Bingham Simplificado	$\tau_b = \frac{3}{2}\tau_y + 3\mu_B \frac{ u }{h}$	Viscoplástico coesivo
4	Coulomb Turbulento	$\tau_b = \tau_f + \rho g \psi \frac{n^2 u ^2}{h^{1/3}}$	Turbulento friccional com $\tau_f = (\rho g \psi h - Pb) \tan \delta_f$
5	Rendimento Turbulento	$\tau_b = \tau_f + \rho g \psi \frac{n^2 u ^2}{h^{1/3}}$	Coesivo turbulento
6	Coulomb/Rendimento Turbulento	$\tau_b = \min(\tau_y, \tau_f) + \rho g \psi \frac{n^2 u ^2}{h^{1/3}}$	Turbulento friccional/coesivo com $\tau_f = (\rho g \psi h - Pb) \tan \delta_f$
7	Quadrático	$\tau_b = \tau_y + \frac{k_0}{8} \mu_B \frac{ u }{h} + \rho g \psi \frac{n^2 u ^2}{h^{1/3}}$	Coesivo Viscoso/Turbulento com $k_0=24$
8	Granular	$\tau_b = \rho g \psi h \tan \delta_f$	Fricção puro seco
9	Coulomb Viscoplástico	$\tau_b = \tau_f + \left(\frac{2m+1}{m}\right)^m \mu_P \left(\frac{ u }{h}\right)^m$	Afinamento por cisalhamento por atrito $m < 1$ ou espessamento por cisalhamento $m > 1$, com $\tau_f = (\rho g \psi h - Pb) \tan \delta_f$

Fonte: Adaptado (HYDRONIA, 2024).

4.8. Coeficiente de Manning

A identificação do coeficiente de rugosidade Manning é de extrema importância para a hidráulica de forma geral, pois ele representa a avaliação dos fatores de atrito, que simulam a perda de carga do fluxo (BAPTISTA; LARA, 2014). Entretanto, sua definição é complexa, principalmente se tratando de cursos d'água naturais, devido aos vários tipos de características físicas presente nos cursos d'água e que afetam esse coeficiente (TEIXEIRA *et al.*, 2018).

A declividade, seção hidráulica, presença de rochas e vegetação impactam diretamente nos resultados hidráulicos, por isso a importância de se realizar a calibragem nos modelos dos valores manning em locais com vazões conhecidas sempre que possível. Nos modelos bidimensionais uma das metodologias adotadas para a calibração dos coeficientes de Manning é o ajuste dos coeficientes de rugosidade do fundo do curso d'água com o objetivo de reproduzir as elevações medidas (Tonina e Jorde, 2013 *apud* TEIXEIRA *et al.*, 2018).

Segundo Baptista e Lara (2014) existem alguns procedimentos para a determinação ou fixação do coeficiente de rugosidade de Manning, podendo ser a partir da determinação direta do coeficiente de rugosidade, estimativa do coeficiente ou definição do coeficiente para seções simples com rugosidade variável.

A determinação direta e seções simples para a definição do coeficiente de Manning, se dão a partir de medições de vazões, nível d'água e caracterização físicas das seções hidráulicas

(BAPTISTA; LARA, 2014). No entanto, para estudos de ruptura hipotética de barragens, essas metodologias são raramente utilizadas, tendo em vista à grande área topográfica necessária, assim como, prazos e recursos limitados para esse tipo de detalhamento. No âmbito dessa pesquisa serão exploradas as estimativas dos valores de Manning, considerando as possibilidades presentes na literatura e que se aplicam à realidade praticada nas simulações bidimensionais.

A partir da granulometria do material da superfície de contato do curso d'água destaca-se para a expressão de Meyer-Peter e Muller apud Baptista e Lara (2014), que é aplicável em leitos com proporções significativas de material graúdo (Equação 10):

$$n = 0,038 \times d_{90}^{\frac{1}{6}} \quad (10)$$

Onde:

- d_{90} = é o diâmetro da peneira, em metros, que corresponde a 90% do material, em peso.

Outro método para definição do coeficiente de rugosidade é o método de Cowan, também conhecido como método de incrementação. Esse método é baseado nas características do canal e possibilita uma melhor compreensão do atrito durante o escoamento (BAPTISTA; LARA, 2014). Chow (1959) sugere a Equação 11:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m_5 \quad (11)$$

Onde:

- n_0 = o valor base;
- n_1 = valor adicional correspondente às irregularidades nas seções transversais, como erosões, assoreamentos, saliências e depressões na superfície etc.;
- n_2 = valor correspondente às várias características físicas das seções transversais, como tamanho e forma, por exemplo;
- n_3 = valor baseado na presença de obstruções;
- n_4 = valor baseado na influência da vegetação no fluxo;
- m = é o fator baseado no grau de meandrização do curso d'água, ou seja, quanto ao grau de sinuosidade do curso d'água.

Os valores desses fatores são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores de coeficiente de rugosidade “n” de *Manning* - método de *Cowan*

Condição do Canal	Valores	
n_0 Material envolvido	Solo	0,020
	Rocha	0,025
	Pedregulho fino	0,024
	Pedregulho graúdo	0,028
n_1 Grau de irregularidade	Liso	0,000
	Pequeno	0,005
	Moderado	0,010
	Severo	0,020
n_2 Variações da seção transversal	Gradual	0,000
	Alternâncias ocasionais	0,050
	Alternâncias frequentes	0,010 - 0,015
n_3 Efeito das obstruções	Desprezível	0,000
	Pequeno	0,010 - 0,015
	Apreciável	0,020 - 0,030
	Severo	0,040 - 0,060
n_4 Vegetação	Baixa	0,005 - 0,010
	Média	0,010 - 0,025
	Alta	0,025 - 0,050
	Muito alta	0,050 - 0,100
m Grau de meandrização	Pequeno	1,000
	Apreciável	1,150
	Severo	1,300

Fonte: Adaptado (BAPTISTA; LARA, 2014)

Além dos métodos supracitados, atualmente encontra-se na literatura várias referências com tabelas de valores de coeficiente de rugosidade pré-definidos, obtidos através de ensaios e medições de campo (USA, 2024; BAPTISTA; LARA, 2014). Esses valores são apresentados a partir de várias possíveis características de revestimento de canais. Uma extensa lista de valores n compilados para diversos tipos de materiais pode ser encontrada no livro “*Open-Channel Hydraulics de Chow*’ (CHOW, 1959).

Na Tabela 4.4 e Tabela 4.5 são apresentados alguns valores de coeficiente de rugosidade apresentados no livro de Chow (1959) e apresentado por USA (2024).

Tabela 4.4 – Valores de coeficiente de rugosidade “n” de Manning – Segundo Chow

Tipo de canal e descrição	Mínimo	Normal	Máximo
A. Fluxos Naturais			
1. Canais Principais			
a. Limpo, reto, cheio, sem fendas ou poças profundas	0.025	0.030	0.033
b. O mesmo que acima, mas com mais pedras e ervas orgânicas	0.030	0.035	0.040
c. Limpo, sinuoso, algumas piscinas e baixos	0.033	0.040	0.045
d. O mesmo que acima, mas algumas ervas e pedras	0.035	0.045	0.050
e. O mesmo que acima, estágios mais baixos, declives e garrafas mais ineficazes	0.040	0.048	0.055
f. O mesmo que "d", mas com mais pedras	0.045	0.050	0.060
g. Alcances lentos, ervas orgânicas. piscinas profundas	0.050	0.070	0.080
h. Alcances com muitas ervas orgânicas, poças profundas ou canais de inundação com extensões pesadas de madeira e arbustos	0.070	0.100	0.150
2. Planícies Inundáveis			
a. Pasto sem arbusto			
1. Grama curta	0.025	0.030	0.035
2. Grama alta	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sem colheita	0.020	0.030	0.040
2. Culturas maduras em linha	0.025	0.035	0.045
3. Culturas arvenses maduras	0.030	0.040	0.050
c. Escovar			
1. Mato espalhado, ervas espessas pesadas	0.035	0.050	0.070
2. Arbustos e árvores leves, no inverno	0.035	0.050	0.060
3. Arbustos folhas e árvores, no verão	0.040	0.060	0.080
4. Pincel médio a denso, no inverno	0.045	0.070	0.110
5. Pincel médio a denso, no verão	0.070	0.100	0.160
d. Árvores			
1. Terreno limpo com tocos de árvores, sem efeitos	0.030	0.040	0.050
2. O mesmo que acima, mas com fluxo pesado	0.050	0.060	0.080
3. Madeira pesada, poucas árvores caídas, pouca vegetação rasteira, fluxo abaixo dos arbustos	0.080	0.100	0.120
4. Igual ao anterior, mas com fluxo nos galhos	0.100	0.120	0.160
5. Salgueiros densos, verão, retos	0.110	0.150	0.200
3. Riachos de montanha, sem vegetação no canal, margens geralmente íngremes, com árvores e arbustos submersos nas margens			
a. Fundo: cascalhos, pedras e algumas pedras	0.030	0.040	0.050
b. Parte inferior: calçada com pedras grandes	0.040	0.050	0.070
B. Canais alinhados ou construídos			
1. Concreto			
a. Acabamento com acabamento térmico	0.011	0.013	0.015
b. Acabamento flutuante	0.013	0.015	0.016
c. Acabado, com fundo de cascalho	0.015	0.017	0.020
d. Inacabado	0.014	0.017	0.020
e. Gunite, boa seção	0.016	0.019	0.023
f. Gunite, seção ondulada	0.018	0.022	0.025

Fonte: Traduzido (USA, 2024)

Tabela 4.5 – Valores de coeficiente de rugosidade “n” de Manning – Segundo Chow - Continuação

Tipo de canal e descrição	Mínimo	Normal	Máximo
g. Em boa rocha escavada	0.017	0.020	
h. Em rocha escavada irregular	0.022	0.027	
2. Flutuador de fundo de concreto com acabamento nas laterais de:			
a. Pedra revestida em argamassa	0.015	0.017	0.020
b. Pedra estimada em argamassa	0.017	0.020	0.024
c. Alvenaria de entulho de cimento, rebocada	0.016	0.020	0.024
d. Alvenaria de entulho de cimento	0.020	0.025	0.030
e. Escombros secos no enrocamento	0.020	0.030	0.035
3. Fundo de cascalho com laterais de:			
a. Concreto formado	0.017	0.020	0.025
b. Pedra estimada em argamassa	0.020	0.023	0.026
c. Escombros secos ou enrocamento	0.023	0.033	0.036
4. Tijolo			
a. vitrificado	0.011	0.013	0.015
b. Em argamassa de cimento	0.012	0.015	0.018
5. Metal			
a. Superfícies de aço lisas	0.011	0.012	0.014
b. Metal corrugado	0.021	0.025	0.030
6. Asfalto			
a. Suave	0.013	0.013	
b. duro	0.016	0.016	
7. Forro vegetal	0.030		0.500
C. Canais Escavados ou Dragados			
1. Terra reta e uniforme			
a. Limpo, concluído recentemente	0.016	0.018	0.020
b. Limpo, após intemperismo	0.018	0.022	0.025
c. Cascalho, seção uniforme, limpa	0.022	0.025	0.030
d. Com grama curta, poucas ervas	0.022	0.027	0.033
2. Terra, sinuosa e lenta			
a. Sem vegetação	0.023	0.025	0.030
b. Grama, algumas ervas orgânicas	0.025	0.030	0.033
c. Ervas densas ou plantas aquáticas em canais profundos	0.030	0.035	0.040
d. Fundo de terra e lado de entulho	0.028	0.030	0.035
e. Fundo pedregoso e bancos cheios de ervas	0.025	0.035	0.040
f. Fundo de calçada e laterais limpas	0.030	0.040	0.050
3. Escavação ou dragagem com linha de arrasto			
a. Sem vegetação	0.025	0.028	0.033
b. Pincel leve nos bancos	0.035	0.050	0.060
4. Cortes de rocha			
a. Suave e uniforme	0.025	0.035	0.040
b. Irregular e irregular	0.035	0.040	0.050
5. Canais não mantidos, ervas e arbustos			
a. Limpe o fundo, escove nas laterais	0.040	0.050	0.080
b. O mesmo que acima, estágio mais alto de fluxo	0.045	0.070	0.110
c. Ervas densas, tão altas quanto a profundidade do fluxo	0.050	0.080	0.120
d. Pincel denso, estágio alto	0.080	0.100	0.140

Fonte: Traduzido (USA, 2024)

5. METODOLOGIA

Esta pesquisa visa compreender o comportamento do escoamento de um fluido hiperconcentrado diante das variações das propriedades reológicas do material. Para isso, foram realizadas simulações a partir do rompimento hipotético por liquefação de uma barragem de rejeito de minério de ferro. Todos os parâmetros, exceto os reológicos, foram mantidos constantes entre as simulações, permitindo assim explorar as diferentes características do escoamento, como velocidades e profundidades máximas, mobilização, transporte e deposição do material.

Neste capítulo, são descritos os procedimentos adotados para a caracterização física da barragem e os dados de entrada utilizados para a modelagem hidrodinâmica no software RiverFlow2D. A metodologia apresentada considera diferentes aspectos fundamentais para a simulação e análise do comportamento do fluxo.

Inicialmente, no item 5.1, apresenta-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, utilizado para representar a topografia do vale a jusante da barragem.

No item 5.2, são descritas as características gerais do vale a jusante, que influenciam diretamente no escoamento e deposição dos rejeitos. Já o item 5.3 apresenta a caracterização geométrica da estrutura hipotética, que inclui informações sobre altura, volume e outros parâmetros da barragem simulada. Em seguida, no item 5.4, discute-se o modelo matemático computacional adotado, detalhando os métodos e as equações que regem o comportamento do fluido hiperconcentrado.

Os parâmetros de resistência, abordados no item 5.6, são representados pelo coeficiente de Manning, utilizado para descrever a rugosidade do terreno na região de simulação. Esse coeficiente é essencial para determinar como o escoamento interage com o solo e as características superficiais do vale, influenciando diretamente a velocidade do fluxo e a dissipação de energia.

No item 5.7, são apresentadas as condições de contorno adotadas nas simulações, fundamentais para definir as interações entre o fluido e o meio ambiente. A caracterização reológica do rejeito, abordada no item 5.8, explora as propriedades físicas e químicas que influenciam a viscosidade e o comportamento de fluxo do material. O item 5.9 detalha os diferentes cenários analisados, variando as propriedades reológicas para observar o impacto

dessas alterações no escoamento. Por fim, no item 5.10, é apresentada a equação reológica utilizada para modelar o comportamento do fluido e sua interação com o ambiente.

Esses procedimentos fornecem a base necessária para entender como o escoamento do fluido hiperconcentrado se comporta em diferentes cenários de rompimento de barragem. Através dessas análises, espera-se obter insights valiosos sobre as dinâmicas de fluxo, ajudando a prever e mitigar possíveis impactos.

5.1. Modelo Digital de Elevação

O levantamento topográfico é um dos dados de entrada mais importante nas simulações hidráulicas, portanto, para a criação do modelo bidimensional foi realizada uma busca nos bancos de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a fim de encontrar um Modelo Digital de Elevação (MDE) que apresentasse um levantamento com qualidade adequada para modelagem de mapas de inundação.

A escolha da região foi baseada nas seguintes premissas:

- **Ausência de barragens:** A área não deve conter nenhuma barragem existente, a fim de evitar qualquer associação com empresas ou estruturas reais, garantindo a independência e a imparcialidade do estudo. A presença de barragens poderia influenciar na dinâmica do fluxo e na propagação da onda de inundação, tornando a simulação menos representativa de um cenário hipotético.
- **Talvegue extenso:** O vale deve ter uma extensão suficiente para permitir a propagação do fluxo e a análise dos resultados da simulação.
- **Talvegue desobstruído:** Para garantir a correta representação do fluxo no modelo, buscou-se um trecho onde o talvegue estivesse bem definido e livre de obstruções significativas que pudessem impedir a passagem do fluxo. Para identificar tais áreas, foram realizadas simulações preliminares em diferentes trechos do MDE. A obstrução do talvegue foi avaliada pela verificação da ocorrência de represamento ou acúmulo excessivo de água durante a simulação.

Neste sentido, para elaboração do presente trabalho, foi considerado o modelo digital de elevações do município de Rio Piracicaba/MG, disponibilizado no catálogo de metadados da ANA (2024). A agência disponibiliza dados de 26 municípios, elencados pelo Comitê de Bacia do Rio Doce, gerados a partir das imagens estereopares de alta resolução espacial (0,5m) do satélite WorldView-2, onde o modelo digital de elevação apresenta uma precisão de 1,0 m

na planialtimetria e curvas de nível com equidistância de 1,0 m. A Figura 5.1 apresenta o MDE adotado para o estudo e a Figura 5.2 o mapa de elevações gerado a partir modelo.

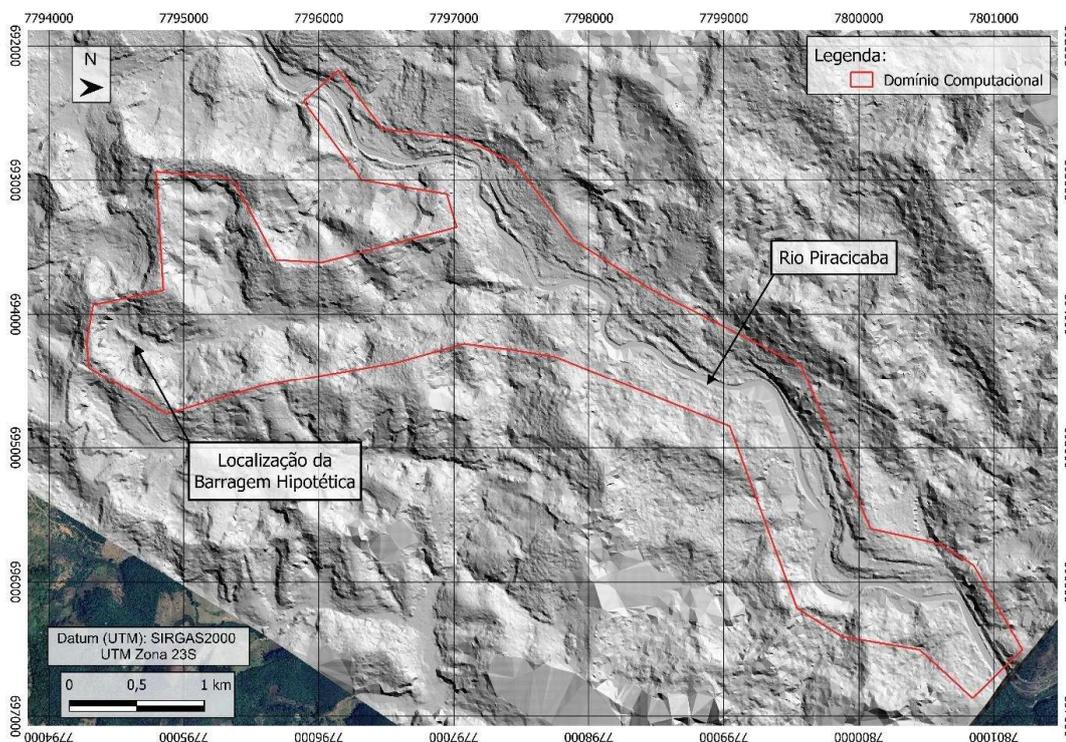


Figura 5.1 – Modelo digital de elevação (MDE) da área em estudo
Fonte: Próprio Autor (2024)

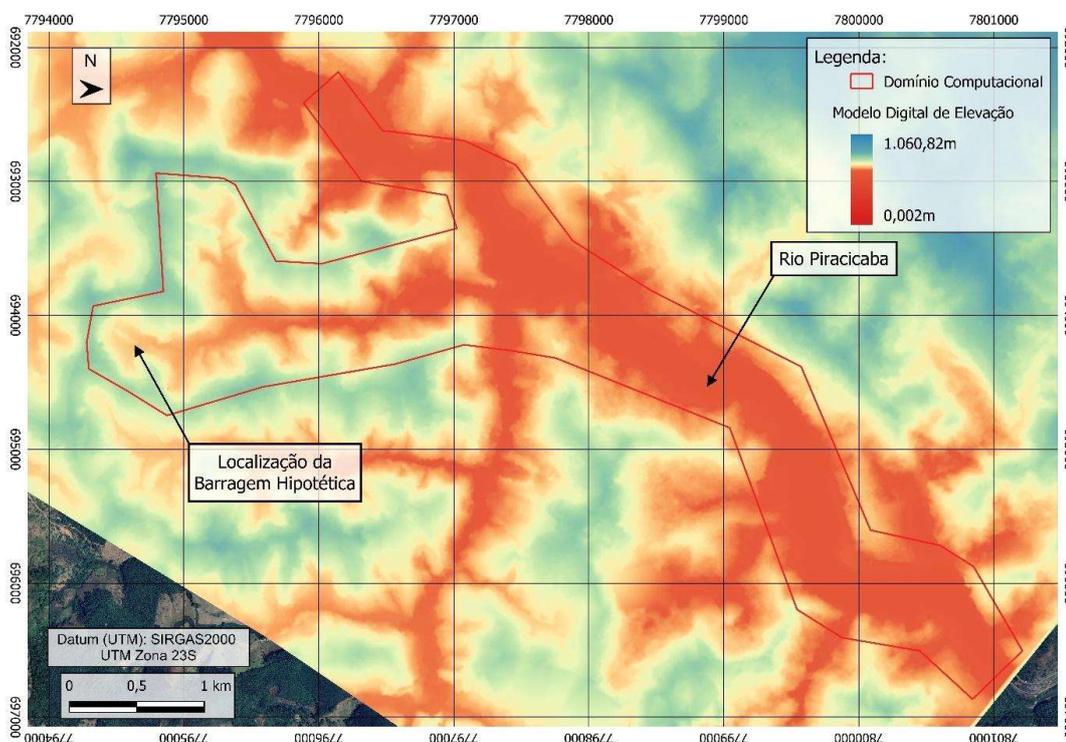


Figura 5.2 – Mapa de elevações da área em estudo
Fonte: Próprio Autor (2024)

5.2. Características Gerais do Vale a Jusante

A barragem hipotética ficará situada nas proximidades da cidade de Bicas/MG, posicionada em um talvegue com uma extensão de 3,1 km até seu deságue no Rio Piracicaba. Essa configuração geográfica resulta em um trecho analisado que totaliza 8,90 km.

Conforme análise de imagens de satélite disponíveis pelo Google Earth, a região de estudo é composta predominantemente por vegetação densa. Ao longo do trecho estudado, foi observada a existência de acessos locais, rodovias, ferrovias e benfeitorias com ocupação humana. Na Figura 5.3 de maneira representativa, as características predominantes do uso do solo no vale a jusante da barragem hipotética. Essa figura é fundamental para compreender visualmente a interação entre a ocupação humana e os ambientes naturais, permitindo uma avaliação mais clara dos impactos potenciais da barragem sobre a região.



Figura 5.3 – Vale a jusante da barragem hipotética a jusante
 Fonte: Adaptado de Google Earth (2024)

5.3. Características da Estrutura Hipotética

Além das premissas apresentadas no tópico 4.1, o local de implantação da barragem levou em consideração as condições que enquadrem a estrutura na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). De acordo com o §1º do art. 1º da Resolução Nº 95 de 2022, as barragens que abrangem a política precisam apresentar pelo menos uma das seguintes características:

I - Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;

- II - Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);
- III - Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- IV - Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, conforme definido no inciso XVI do art. 2º e no Anexo IV; e
- V - Categoria de risco alto, conforme definido no inciso XI do art. 2º, § 1º do art. 5º e Anexo IV desta Resolução.

A estrutura em estudo foi projetada com 40,6 m de altura, dos quais 38,3 m correspondem à altura em relação ao eixo da barragem. A inclinação do talude de jusante foi definida como 1V:2H, o que é considerada íngreme para barragens com alturas entre 30,0 m e 60,0 m (BRASIL, 2022). O volume total de armazenamento da barragem foi estimado em aproximadamente 1,9 milhões de m³.

Além disso, segundo Pinheiro (2011) e de acordo com a Resolução N° 143 de 10 de julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a barragem hipotética seria classificada como grande, por apresentar altura superior a 30,0 m, e como média, por possuir um volume de armazenamento entre 1,0 e 50 milhões de m³, conforme mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Classificação das barragens pela dimensão

Categoria	Altura - H (m)	Volume Armazenado (10⁶ m³)
Pequena	5,0 < H < 15,0	0,05 < 1,00
Média	15,0 < H < 30,0	1,00 < 50,00
Grande	H > 30,0	V > 50,00

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2011)

Na Figura 5.4 e na Figura 5.5 são apresentadas a planta e o perfil com a implantação da barragem hipotética estudada, juntamente com suas características físicas.

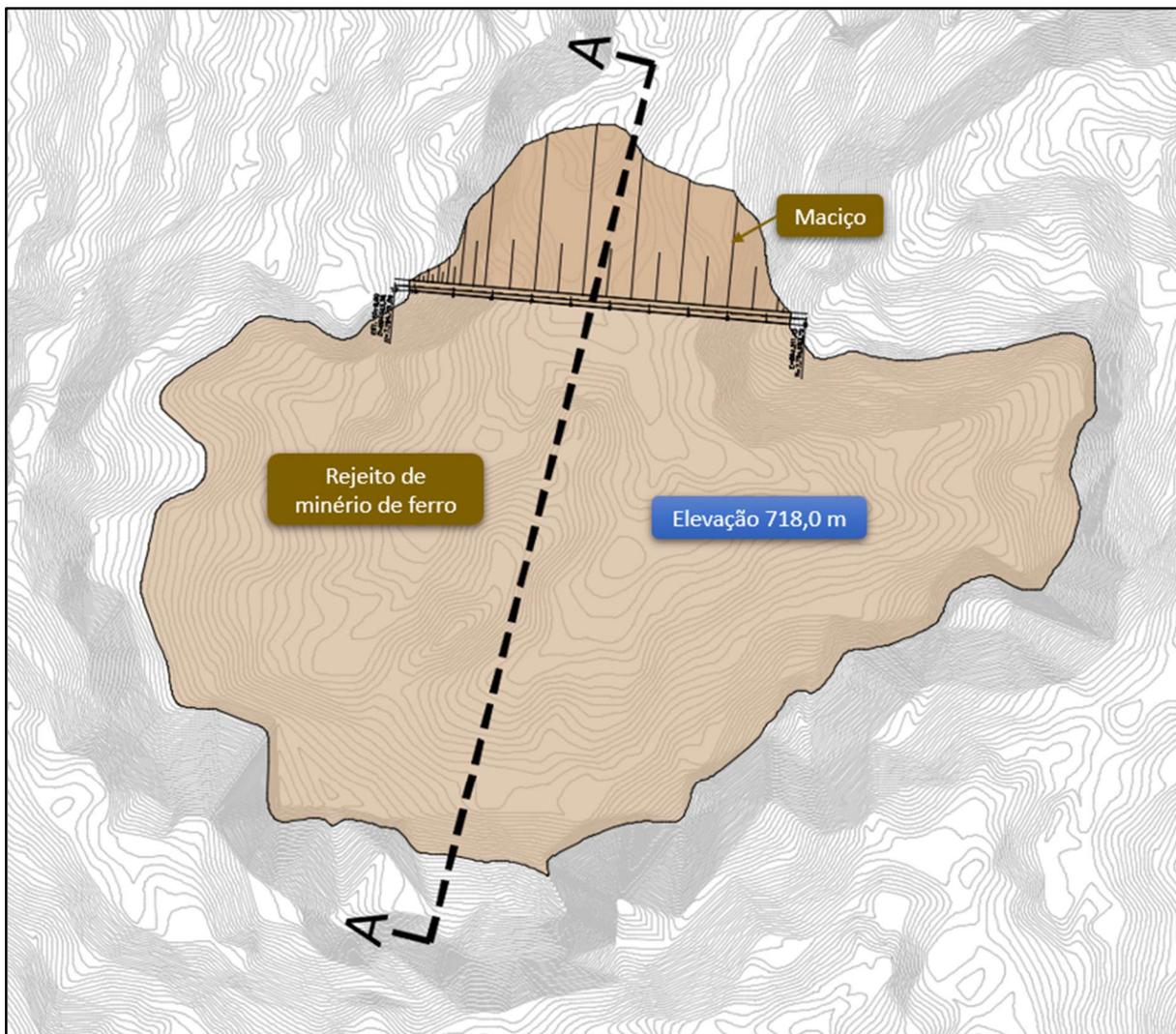


Figura 5.4 – Planta da barragem hipotética em estudo
Fonte: Próprio Autor (2024)

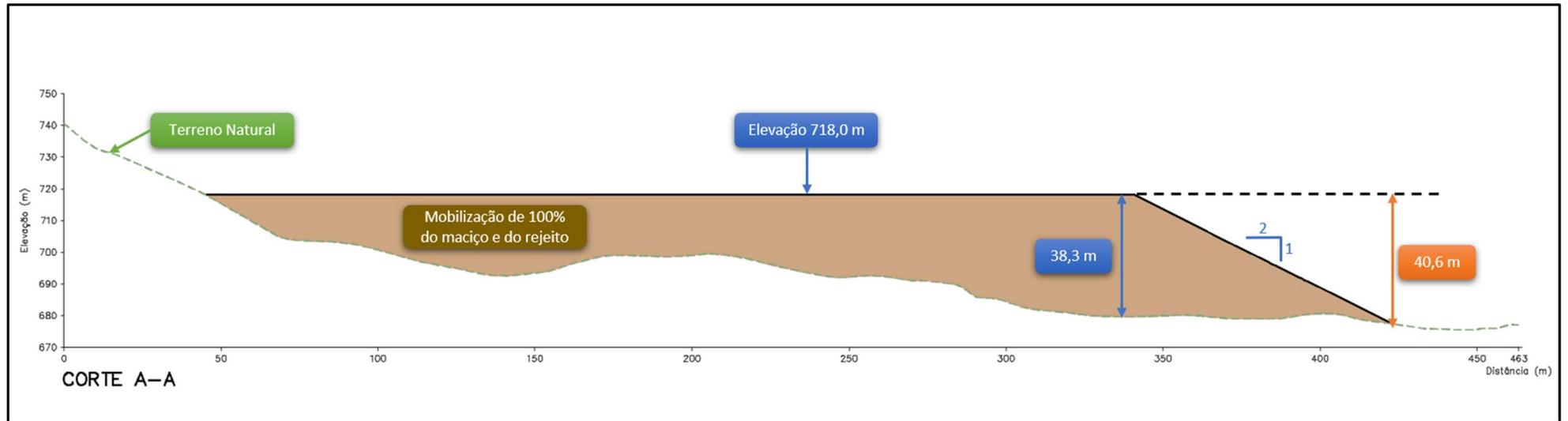


Figura 5.5 – Perfil da barragem hipotética em estudo
Fonte: Próprio Autor (2024)

5.3.1. Curva Cota x Área x Volume

Com base na topografia original, ou seja, a base topográfica anterior à implantação da barragem, e na topografia referente à estrutura, foi possível determinar o volume de armazenamento da barragem.

O cálculo do volume foi realizado utilizando o método das superfícies planas e equidistantes, conforme ilustrado no croqui da Figura 5.6. Esse método se baseia na Equação 12, que permite o cálculo aproximado do volume entre duas áreas de contorno conhecidas:

$$V = \left(\sqrt{A_1 \times A_2} + A_1 + A_2 \right) \times \frac{h}{3} \quad (12)$$

Onde:

- V = volume, em metros cúbicos (m^3)
- A_1 e A_2 = áreas das seções transversais adjacentes, em metros quadrados (m^2);
- h = distância vertical entre as áreas (equidistância), em metros (m).

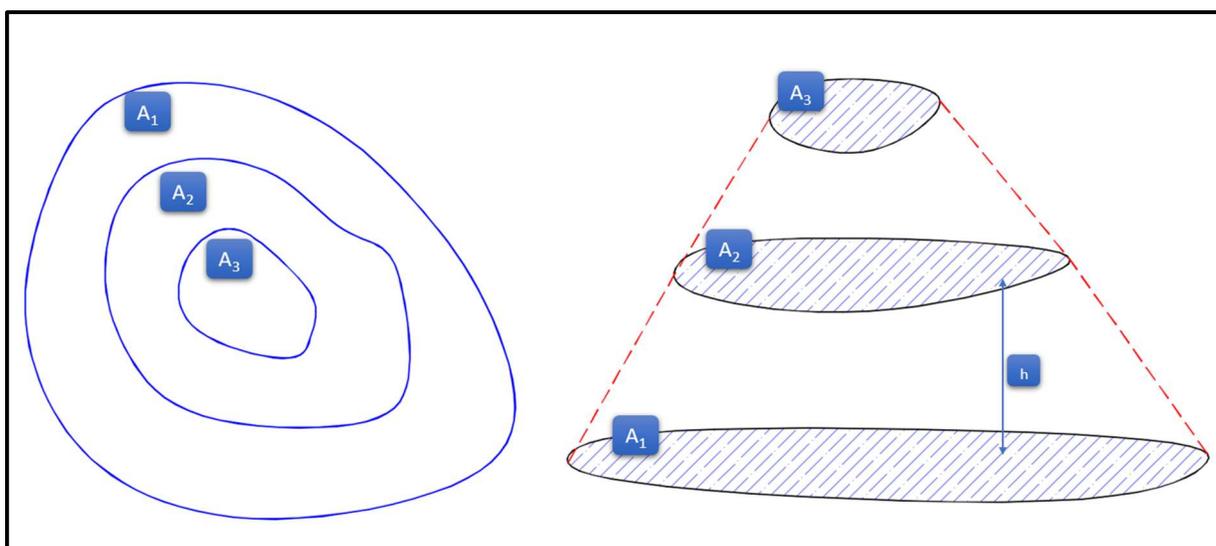


Figura 5.6 – Croqui para o cálculo do volume por superfícies planas
Fonte: Próprio Autor (2024)

Com base nas curvas de nível extraídas da topografia e aplicando a metodologia descrita, os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 5.7 e apresentados na Tabela 5.2.

É importante destacar que, para o presente estudo, não foi realizada a discretização do volume de sólidos e água presentes no maciço, rejeito ou sobrenadante. Isso se deve ao fato de que esses valores influenciam diretamente a concentração volumétrica do material a ser propagado, o que impacta as características reológicas do fluxo. No entanto, o estudo trata de

uma análise de sensibilidade com diferentes concentrações volumétricas previamente definidas. Dessa forma, a discretização dos materiais propagados não interfere nos resultados da simulação, já que os parâmetros reológicos foram determinados com base nessas concentrações preestabelecidas. Entretanto, é importante ressaltar que, em estudos de ruptura de barragens, a discretização do material e a definição precisa da concentração volumétrica são essenciais para análises mais detalhadas e representativas.

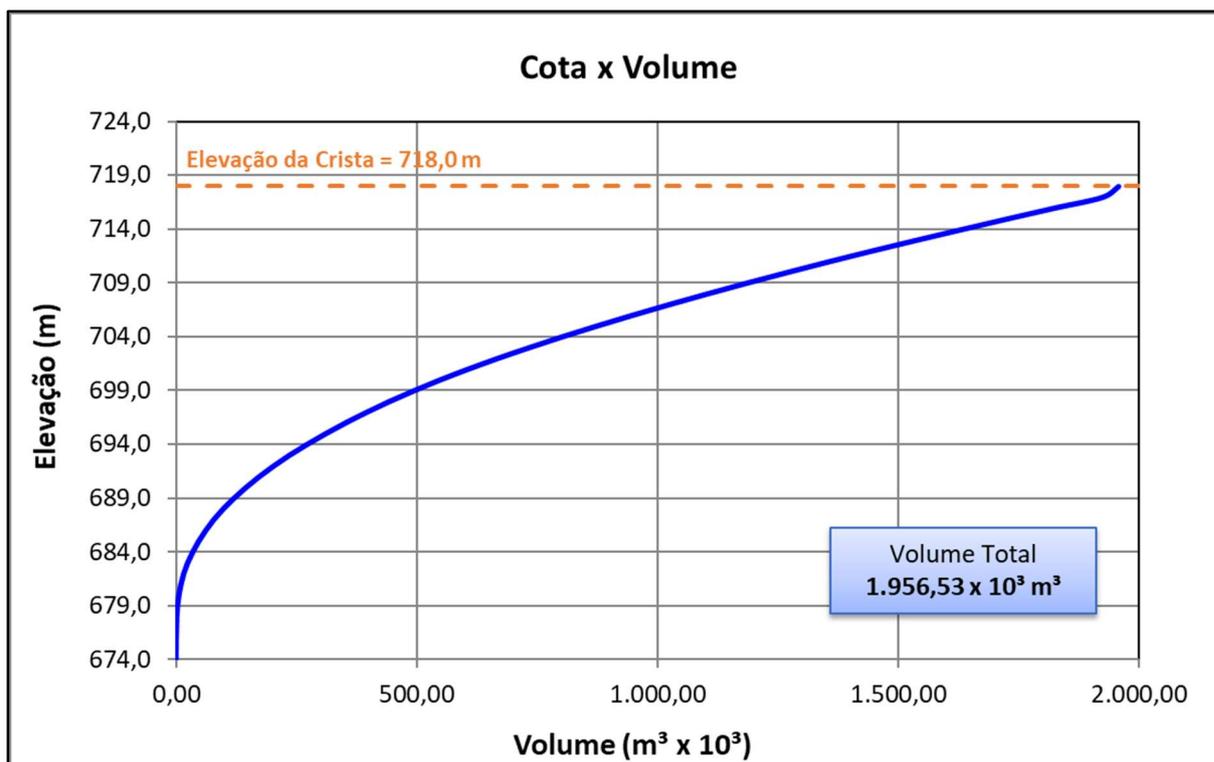


Figura 5.7 – Planta e perfil da barragem hipotética em estudo
Fonte: Próprio Autor (2024)

Tabela 5.2 – Dados de Cota x Área x Volume da barragem em estudo

CÁLCULO COTA x ÁREA x VOLUME				
ELEVAÇÃO (m)	ÁREA (m²)	ALTURA (m)	VOLUME PARCIAL (m³)	VOLUME ACUMULADO (m³)
674,00	61,86	0,00	0,00	0,00
675,00	285,03	1,00	159,89	159,89
676,00	431,90	1,00	355,93	515,82
677,00	581,18	1,00	504,70	1.020,52
678,00	738,59	1,00	658,31	1.678,84
679,00	2301,02	1,00	1.447,75	3.126,59
680,00	3556,04	1,00	2.905,86	6.032,45
681,00	4959,73	1,00	4.238,47	10.270,92
682,00	6840,87	1,00	5.875,15	16.146,07
683,00	9402,12	1,00	8.087,63	24.233,69
684,00	11460,29	1,00	10.414,24	34.647,94
685,00	13441,92	1,00	12.437,94	47.085,88
686,00	15432,99	1,00	14.426,00	61.511,88
687,00	17866,59	1,00	16.634,95	78.146,83
688,00	21361,45	1,00	19.588,02	97.734,85
689,00	23527,11	1,00	22.435,57	120.170,42
690,00	25996,99	1,00	24.751,78	144.922,20
691,00	28646,65	1,00	27.311,11	172.233,31
692,00	31543,39	1,00	30.083,40	202.316,70
693,00	34504,67	1,00	33.012,96	235.329,66
694,00	37453,89	1,00	35.969,20	271.298,86
695,00	39960,52	1,00	38.700,44	309.999,30
696,00	42678,10	1,00	41.311,86	351.311,16
697,00	45552,71	1,00	44.107,60	395.418,76
698,00	49111,86	1,00	47.321,13	442.739,89
699,00	52418,45	1,00	50.756,18	493.496,07
700,00	55797,72	1,00	54.099,29	547.595,36
701,00	59543,42	1,00	57.660,43	605.255,79
702,00	63722,44	1,00	61.621,12	666.876,91
703,00	66661,61	1,00	65.186,50	732.063,41
704,00	69751,48	1,00	68.200,71	800.264,13
705,00	72850,57	1,00	71.295,41	871.559,54
706,00	75445,94	1,00	74.144,47	945.704,01
707,00	78048,55	1,00	76.743,57	1.022.447,57
708,00	80602,41	1,00	79.322,05	1.101.769,63
709,00	83249,02	1,00	81.922,15	1.183.691,78
710,00	85745,18	1,00	84.494,03	1.268.185,81
711,00	87938,91	1,00	86.839,74	1.355.025,54
712,00	90644,64	1,00	89.288,36	1.444.313,90
713,00	92691,25	1,00	92.484,52	1.536.798,42
714,00	94336,68	1,00	94.316,44	1.631.114,86
715,00	95951,01	1,00	95.926,84	1.727.041,70
716,00	97525,84	1,00	97.487,78	1.824.529,48
717,00	99032,67	1,00	98.993,54	1.923.523,02
718,00	100468,53	1,00	33.010,89	1.956.533,91
			Volume Total =	1.956.533,91

Fonte: Próprio Autor (2024)

5.4. Modelo Matemático Computacional

Para simulação da propagação da onda de ruptura hipotética, neste estudo aplicou-se o modelo computacional bidimensional (2D) RiverFlow2D 08.12.05. Para tanto, foi utilizado o módulo de corrida de lama e escoamento de rejeitos (*Mud/Tailings Flow*), que possui diversas formulações reológicas para os escoamentos de hiperconcentrados, podendo simular a propagação com fluidos diluídos (escoamento turbulento) a fluidos mais concentrados (movimento de massa).

De acordo com a formulação reológica adotada no RiverFlow2D, o modelo leva em consideração os parâmetros mais característicos e representativos da massa, tais como a tensão de cisalhamento (τ_y), viscosidade dinâmica (η) e densidade do fluido (ρ), os quais são obtidos através dos ensaios de reologia e caracterização dos rejeitos depositados no reservatório. A partir da variabilidade desses parâmetros será realizada a análise de sensibilidade nos resultados das manchas de inundação durante as simulações de ruptura da barragem.

Para a definição dos volumes finitos de controle, o modelo RiverFlow2D utiliza malhas não-estruturadas, ou malha flexível. A malha é triangular, possui diversos tamanhos e pode ser adaptada a topografias irregulares, limites, estruturas ou qualquer outro tipo de obstáculo (HYDRONIA, 2022), sendo, portanto, capazes de representar satisfatoriamente o contorno geométrico do terreno. Para a modelagem do fluxo bidimensional, foi realizado um estudo de convergência de malha com o objetivo de identificar a relação ideal entre a precisão dos resultados e a eficiência da modelagem.

A região limitada pela malha computacional corresponde ao limite em que os cálculos da modelagem bidimensional serão realizados, com base no Modelo Digital do Elevação (MDE) utilizado. O domínio computacional gerado para o processamento das simulações é apresentado na Figura 5.8, bem como a representação do MDE e a malha triangular adotados nas simulações para todos os cenários de ruptura.

Para avaliação dos resultados da propagação da onda de cheia máxima, neste estudo foram consideradas 9 (nove) seções, localizadas em pontos distintos ao longo do vale a jusante e nos trechos de possíveis remanso. A localização das seções supracitadas é apresentada na Figura 5.9 e na Tabela 5.3.

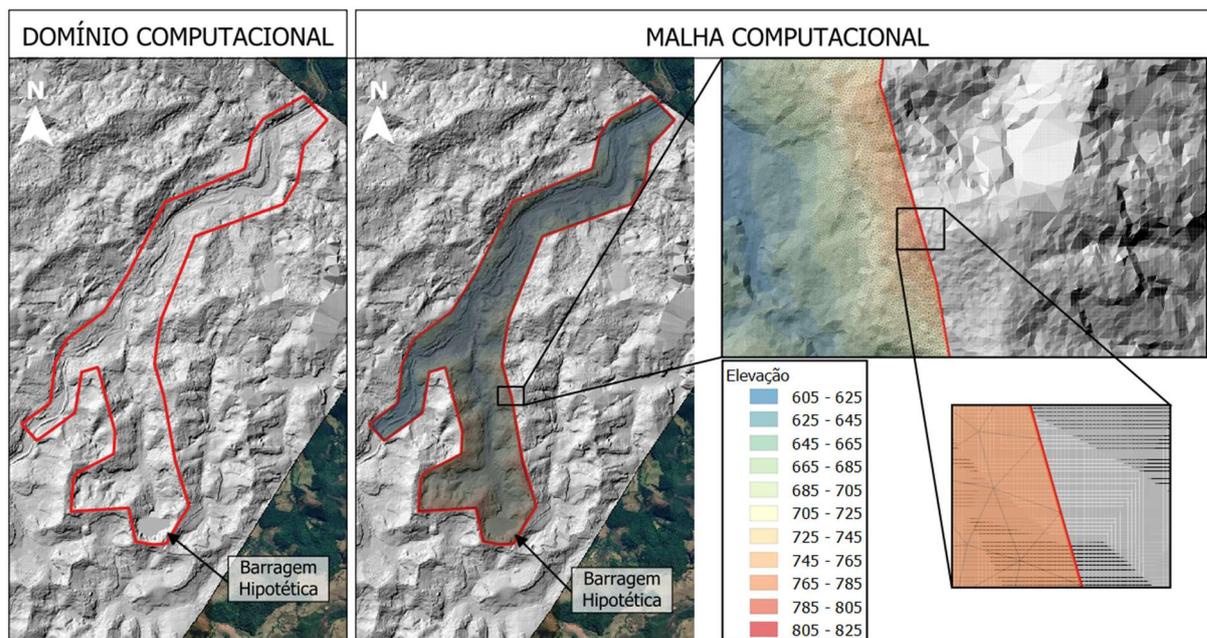


Figura 5.8 – Malha computacional.
Fonte: Adaptado (ANA, 2024)

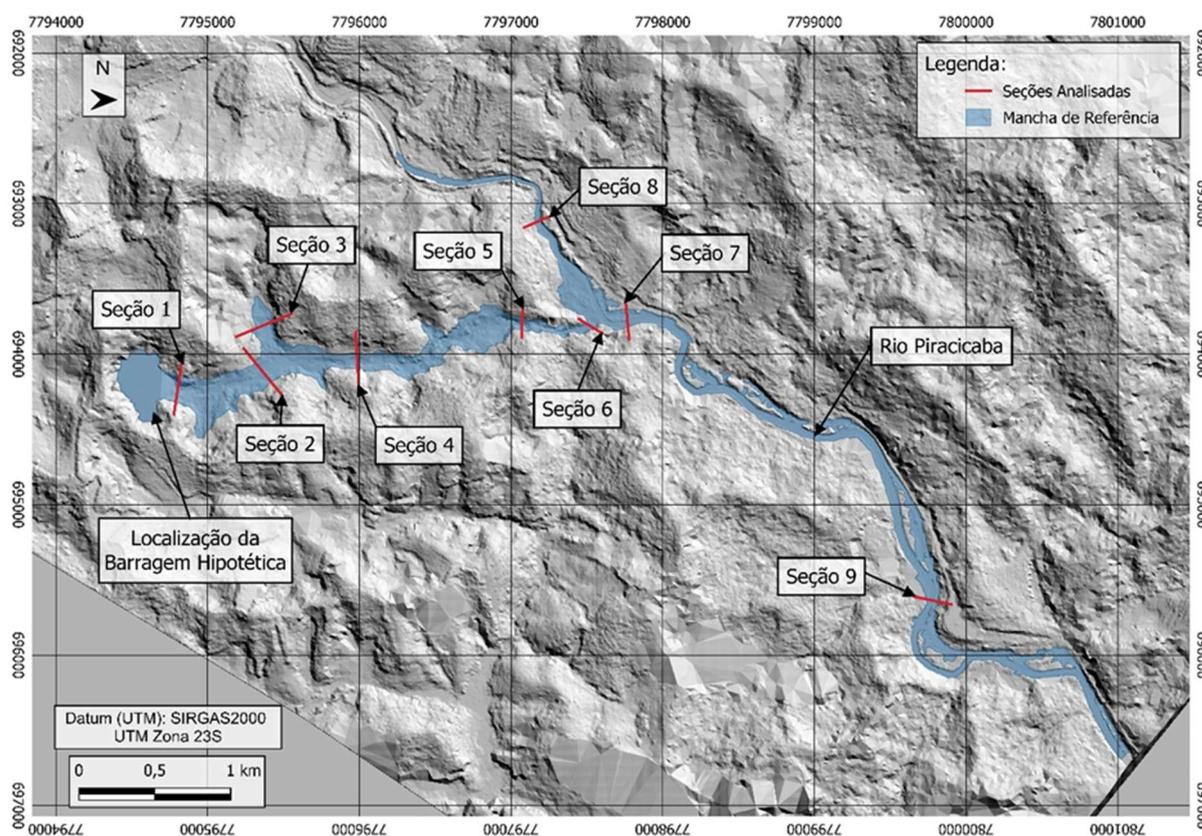


Figura 5.9 – Localização das seções analisadas.
Fonte: Próprio Autor (2024)

Tabela 5.3 – Descrição das seções analisadas

ID	Localização	Distância da Barragem (km)
Seção 1	Imediatamente a jusante da barragem	0,05
Seção 2	A montante da confluência de um pequeno talvegue	0,64
Seção 3	Possível remanso	0,76
Seção 4	Talvegue principal	1,28
Seção 5	Talvegue principal	2,48
Seção 6	A montante da confluência com o Rio Paraíba	2,93
Seção 7	Rio Paraíba	3,22
Seção 8	Remanso no Rio Paraíba	3,81
Seção 9	Rio Paraíba	6,46

Fonte: Próprio Autor (2024)

5.5. Estudo de convergência de malha

A escolha do tamanho adequado da malha computacional possui um papel importante na determinação da precisão e eficiência das simulações numéricas em modelos hidrodinâmicos. Um dimensionamento inadequado pode comprometer tanto a precisão dos resultados quanto a viabilidade computacional do estudo (BAI; XU; LU, 2007). Nas simulações de ruptura de barragem, a definição do tamanho da malha se torna ainda mais relevante, uma vez que afeta diretamente a capacidade do modelo em representar de forma precisa a propagação da onda de inundação e ao mesmo tempo possui limitações com relação aos recursos computacionais disponíveis.

O software RiverFlow2D, amplamente utilizado em simulações hidrodinâmicas de rios e áreas inundáveis (HYDRONIA, 2022), foi selecionado para a realização deste estudo. Este software utiliza o método dos volumes finitos em uma malha triangular não estruturada, o que o torna adequado para a modelagem de uma ampla gama de simulações, incluindo a ruptura de barragens.

Neste estudo, a metodologia aplicada visa identificar a malha computacional que ofereça o melhor equilíbrio entre a precisão dos resultados e processamento. Ademais, foi considerado como referência a Resolução nº 95 da ANM, que especifica a necessidade de simulação em modelos bidimensionais para representar o rompimento de uma barragem hipotética.

Os dados topográficos, as características do reservatório e os dados reológicos foram integrados ao modelo, com o objetivo de replicar um cenário realista de simulação de ruptura.

As simulações foram realizadas variando a malha em sete diferentes tamanhos diferentes: 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 10 m, 15 m e 20 m. Essas resoluções foram selecionadas com o objetivo de abranger uma grande variação de tamanhos de malha, desde as mais refinadas (5 m) até as mais grosseiras (20 m), fornecendo uma análise detalhada do impacto do tamanho da malha na precisão e no desempenho computacional das simulações.

As métricas de avaliação utilizadas para a análise de convergência de malha foram:

- Tempo de processamento.
- Tamanho do arquivo gerado.
- Área da mancha de inundação.
- Tempo de chegada da frente de onda.
- Tempo de chegada da onda máxima.

Essa etapa foi realizada com o objetivo de determinar a malha que oferece o melhor ajuste entre a qualidade dos resultados obtidos e a eficiência computacional, oferecendo dados suficientes para a definição do tamanho de malha a ser adotado nas próximas simulações, referente à análise de sensibilidade dos parâmetros reológicos.

5.6. Parâmetros de Resistência

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) reflete na perda de carga no fluxo ao longo do vale a jusante da barragem, que leva em conta os efeitos da rugosidade do leito, assim como o atrito interno e as variações na forma e tamanho da seção transversal do canal, obstruções, meandros do rio (Hydronia, 2024 *apud* CHOW, 1959).

O valor do coeficiente de Manning é muito variável e depende de vários fatores, como: rugosidade da superfície; vegetação; irregularidades no canal; alinhamento do canal; limpeza e deposição; obstruções; tamanho e formato do canal; mudanças sazonais; temperatura; material suspenso e carga de leito (USA, 2024). Dessa forma, o valor deste coeficiente deve ser adequado e representativo com relação à região em estudo, pois ele interfere diretamente na precisão das elevações calculadas da superfície da água.

Para a determinação ou fixação do coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi aplicada a seguinte metodologia.

- Delimitação de áreas em função dos tipos de uso e ocupação do solo, identificados através de imagens disponibilizadas no Google Earth, na região de interesse;
- Utilização de tabelas com valores de coeficientes de rugosidade de Manning para diferentes tipos de cobertura vegetal e ocupação, conforme a referência técnica *Open-Channel Hydraulics*, de Ven Te Chow (1959).

A Figura 5.10 apresenta o mapa com a delimitação das áreas, de acordo com os tipos de uso e ocupação do solo identificados a jusante da barragem. Os valores de rugosidade de Manning adotados são apresentados na Tabela 5.4. O valor referente à área antropizada, foi extraído de Mello e Eleutério (2021), ressalta-se que esses valores são comumente adotados em trabalhos técnicos.

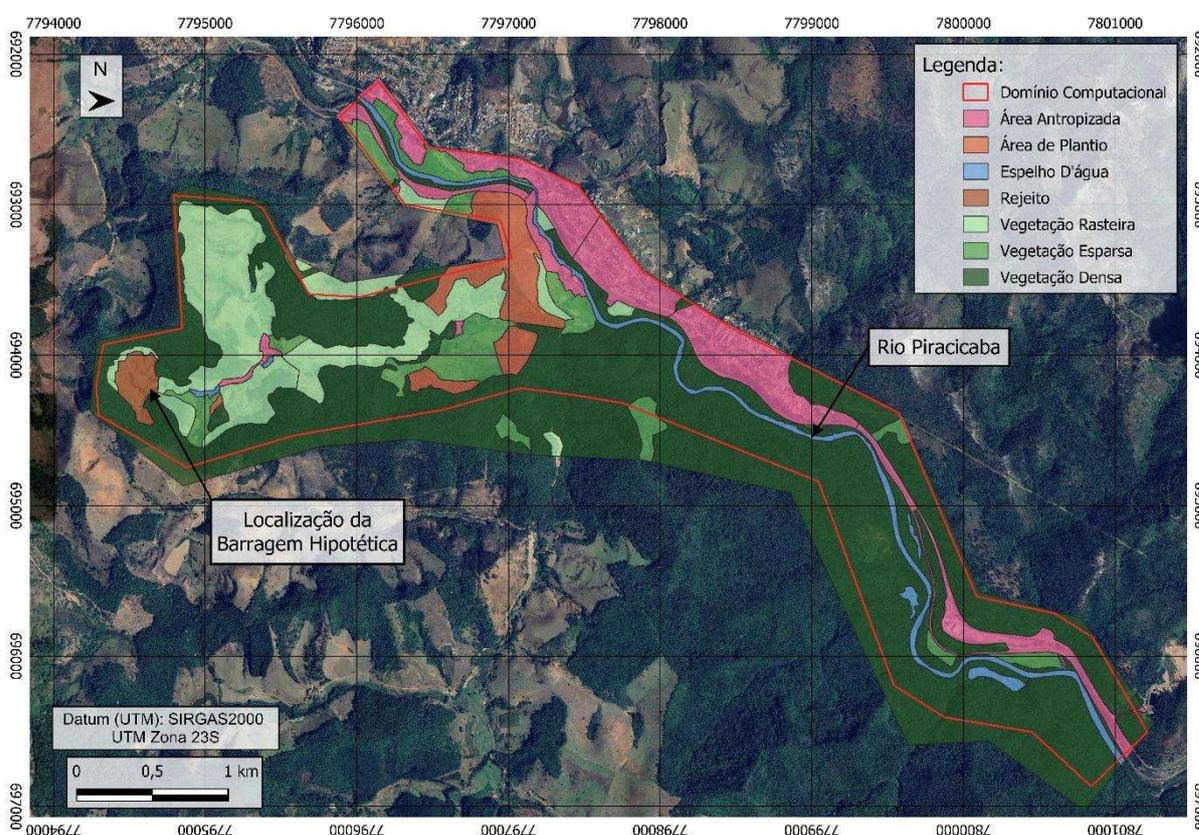


Figura 5.10 – Mapa de uso e ocupação do solo.
Fonte: Adaptado (ANA, 2024)

Tabela 5.4 – Coeficientes de Manning (n).

Uso e Ocupação do Solo	Coeficiente de Manning (n)
Área Antropizada	0,100
Área de Plantio	0,100
Espelho D'água	0,040
Solo exposto e limpo	0,040
Vegetação rasteira ou grama alta	0,050
Vegetação esparsa com árvores	0,065
Vegetação densa com muitas árvores	0,080

Fonte: Adaptado de Chow (1959)

5.7. Condições de Contorno

De acordo com Ribeiro (2015), durante um evento de ruptura em barragens de rejeito, normalmente, o volume segregado do reservatório varia de 30% a 50% do volume total armazenado no reservatório e, em alguns casos, podendo chegar a 100% do volume. A definição quantitativa do volume propagado é um tema que não está findado na literatura técnica, sendo sensível a diversos fatores, como morfologia do reservatório, características e estado dos rejeitos e da topografia.

O §5º do Art. 6º da Resolução Nº 95 de 2022 da ANM estabelece os seguintes critérios de modo de falha e mobilização em estudos de ruptura de barragem:

Os estudos de ruptura e mapas de inundação devem considerar o modo de falha que ocasione o cenário de maior dano, independentemente da probabilidade de ocorrência, sendo que, para o caso de modo de falha por liquefação, quando aplicável, devem ser consideradas as mobilizações máximas, fisicamente possíveis, dos volumes do maciço e dos materiais contidos no reservatório, com apresentação da metodologia utilizada para definição do volume mobilizável e observando-se as condições reológicas dos materiais.

Com base nessa diretriz, o presente estudo adotou a ruptura por liquefação de uma estrutura hipotética, considerando a mobilização de 100% do material armazenado, além da mobilização integral do maciço. A Figura 5.11, ilustra a situação pré-ruptura e pós-ruptura, destacando as alterações significativas na estrutura.

Além disso, para o cenário de ruptura por liquefação, assume-se que a estrutura colapsa de forma instantânea, com um colapso tão rápido que o tempo de formação da brecha pode ser desconsiderado. Essa abordagem é fundamental para compreender a dinâmica do evento e seus impactos potenciais, sendo também o cenário fisicamente mais impactante no contexto estudado.

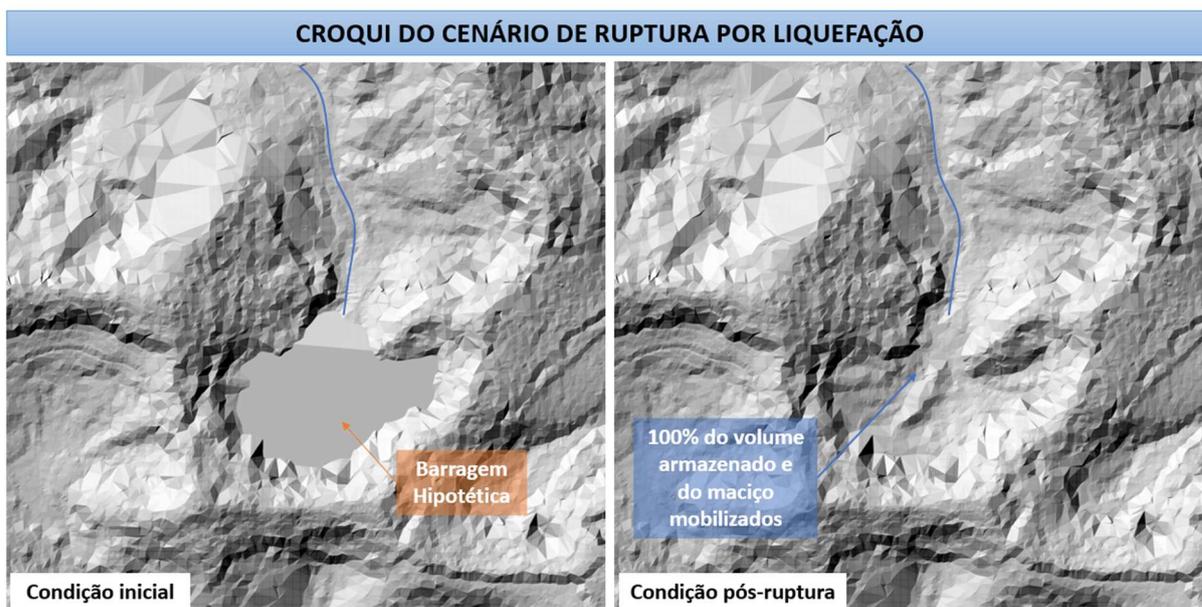


Figura 5.11 – Croqui da condição inicial e pós ruptura da barragem hipotética

Fonte: Adaptado (ANA, 2024)

As condições de contorno de montante nos estudos de ruptura hipotética por liquefação no software RiverFlow2D são definidas pela entrada de dois *rasters*, referentes a duas superfícies distintas:

- Condição inicial: representa a situação antes da ruptura;
- Pós-ruptura: corresponde à topografia primitiva acrescida do material que permanecerá depositado e não será propagado; neste estudo, refere-se à topografia primitiva.

A partir dos dois *rasters* referentes aos terrenos, o software realiza a interpolação e calcula o volume propagado com base nas diferentes elevações entre as duas superfícies.

A condição de contorno de jusante, aplicada no limite da geometria do trecho do modelo hidráulico, foi definida pela profundidade normal, calculada a partir da declividade do vale nesse trecho. A declividade na extremidade do trecho estudado é muito baixa, uma vez que o levantamento topográfico considera a superfície da água e não o fundo do vale. Portanto, adotou-se uma declividade de 0,01% como condição de contorno a jusante.

5.8. Caracterização Reológica do Rejeito

O estudo tem como finalidade a observação e análise dos resultados que caracterizem de forma real o comportamento do fluxo do rejeito de minério de ferro. Sendo assim, foram disponibilizados para a autora os resultados reológicos de uma estrutura de contenção de rejeitos de minério de ferro, estrutura essa que não será citada no presente estudo. Todo o

modelo foi montado a partir de uma estrutura hipotética, onde suas dimensões foram definidas a partir de recomendações técnicas, a fim de aproximar da realidade das estruturas existentes no Brasil.

Para o presente trabalho foram disponibilizadas duas amostras da polpa de rejeito de minério de ferro extraídos da mesma barragem. A Amostra 1 foi analisada para quatro concentrações volumétricas (37,5%; 42,4%; 45,4% e 48,5%), enquanto a Amostra 2, para cinco concentrações volumétricas (42,8%; 45,7%; 48,6%; 51,5% e 55,5%).

A Figura 5.12 ilustra o fluxograma das análises laboratoriais realizadas para caracterizar as amostras de rejeito. O esquema se divide em duas categorias principais: Ensaio Reológico e Análise das Partículas. O ensaio reológico, focado no estudo do comportamento de fluidos, utiliza duas técnicas: o viscosímetro rotacional, para medir a viscosidade do material, e o Teste Vane, para determinar a tensão de escoamento. A análise das partículas, por sua vez, visa caracterizar fisicamente o material particulado, incluindo a determinação da densidade.

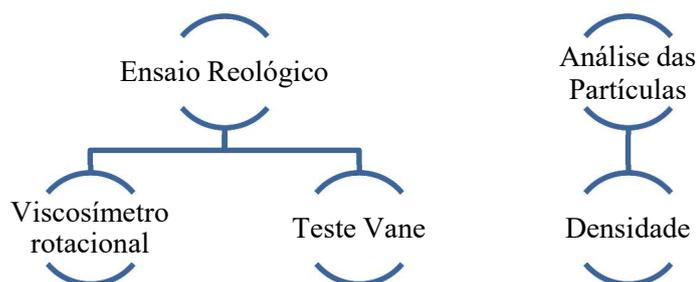


Figura 5.12 – Fluxograma dos ensaios reológicos
Fonte: Próprio Autor (2024)

As curvas reológicas foram interpretadas utilizando o modelo Bingham e são mostradas nos reogramas da Figura 5.13 e da Figura 5.14, referentes às amostras 1 e 2, respectivamente. O modelo de Bingham é apresentado pela seguinte Equação 13 (análoga a Equação 12):

$$\tau = \tau_y + \eta \times \dot{\gamma} \quad (13)$$

Onde:

- τ = tensão de cisalhamento (Pa);
- τ_y = tensão de escoamento (Pa);
- η = viscosidade da polpa (Pa.s);
- $\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (1/s).

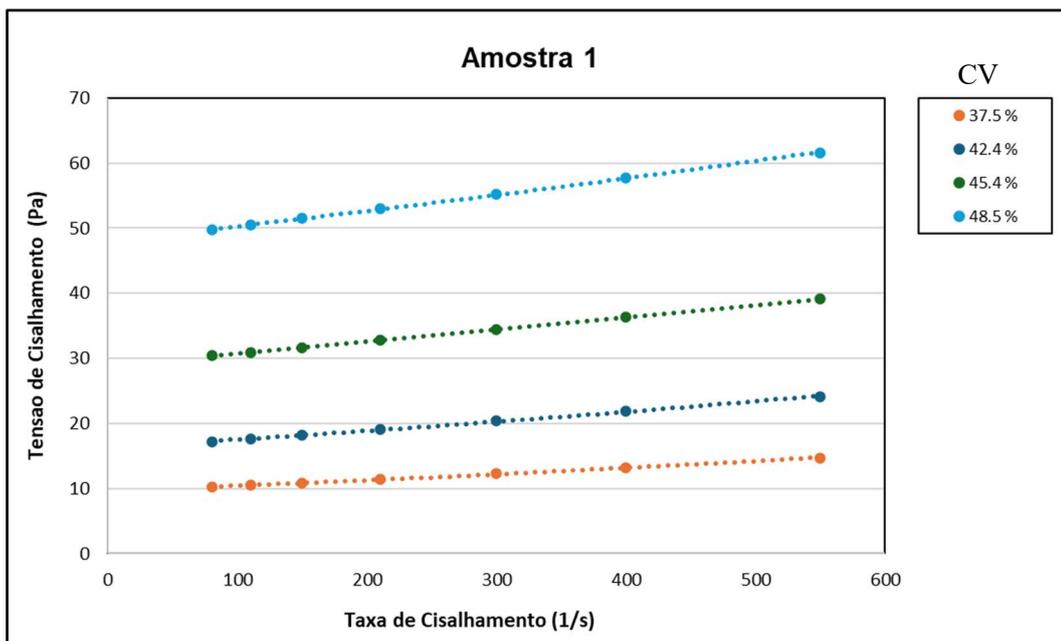


Figura 5.13 – Reograma da Amostra 1
Fonte: Próprio Autor (2024)

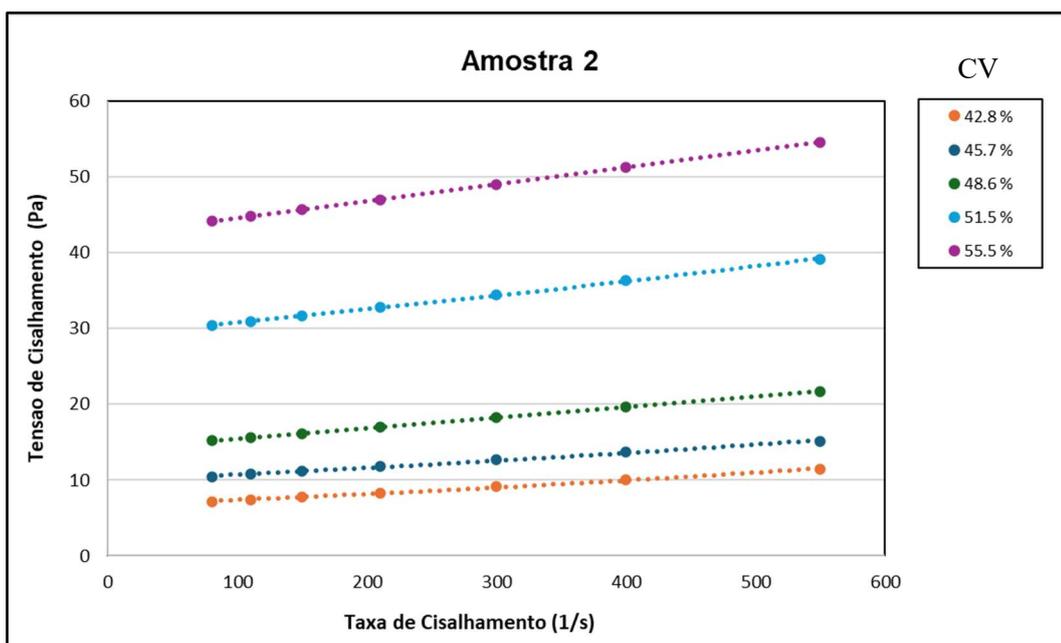


Figura 5.14 – Reograma da Amostra 2
Fonte: Próprio Autor (2024)

Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados reológicos das amostras adotadas. Os valores de tensão de escoamento das pastas foram determinados por meio do Teste Vane.

Tabela 5.5 – Resultados reológicos das amostras

AMOSTRA	Concentração de sólido por peso C_w	Concentração volumétrica ϕ_s	Razão volumétrica V_{r_s}	Viscosidade da polpa η (cP)	Viscosidade da polpa η (Pa.s)	Tensão de escoamento τ_y (Pa)
AMOSTRA 1	37,50	0,164	0,197	9,50	0,0095	9,40
	42,40	0,194	0,241	14,70	0,0147	16,00
	45,40	0,214	0,272	18,50	0,0185	28,90
	48,50	0,236	0,309	25,20	0,0252	47,70
AMOSTRA 2	42,80	0,199	0,249	9,00	0,0090	6,40
	45,70	0,219	0,280	9,90	0,0099	9,70
	48,60	0,239	0,314	13,80	0,0138	14,10
	51,50	0,261	0,353	15,90	0,0159	21,70
	55,50	0,293	0,415	22,30	0,0223	42,30

Fonte: Próprio Autor (2024)

Para a definição da densidade das partículas foi utilizado o método de Picnometria. Onde a determinação da densidade dos sólidos é dado pela Equação 14:

$$\Delta_s = P_{H_2O} \times \frac{A}{(A+B-C)} \quad (14)$$

Onde:

- Δ_s = Concentração de sólido por peso;
- P_{H_2O} = Densidade da água;
- A = Massa do sólido seca;
- B = Tara do balão + massa de água;
- C = Tara do balão + massa de água + massa de sólido.

Os resultados dos ensaios da densidade de sólidos, bem como os valores das porcentagens de sólidos e densidades das amostras como recebidas estão mostrados, na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Características das amostras como recebida

Amostra	Concentração de sólido por peso C_w	Densidade dos sólidos $\Delta_{\text{médio}}$ (g/cm^3)	Densidade da polpa como recebida δ (g/cm^3)
Amostra 1	70,2%	3,037	1,89
Amostra 2	79,5%	3,072	2,16

Fonte: Próprio Autor (2024)

5.9. Cenários Analisados

Este capítulo descreve os cenários desenvolvidos para analisar o comportamento de duas amostras de polpa de rejeito de minério de ferro com diferentes concentrações volumétricas (C_v), variando de 20% a 60%. O principal objetivo é analisar como a tensão de escoamento (τ_y) e a viscosidade (η) – parâmetros reológicos fundamentais – influenciam o comportamento da polpa de rejeito nas simulações realizadas com o RiverFlow2D. A escolha dos valores de C_v (20%, 30%, 40%, 50% e 60%) foi feita para abranger uma ampla gama de comportamentos reológicos do material e analisar a influência da concentração nos resultados da simulação. A concentração volumétrica é um fator crucial na determinação do comportamento reológico da polpa de rejeito, e variar o C_v permite analisar como a fluidez do material se altera e como isso impacta os resultados da simulação de ruptura.

Com base nos resultados reológicos apresentados no item 5.8, foram elaborados gráficos que ilustram a relação entre a Tensão de Escoamento (τ_y) e a Concentração Volumétrica (C_v) (Figura 5.15), assim como a relação entre a Viscosidade (η) e a Concentração Volumétrica (C_v) (Figura 5.16) para ambas as amostras. As curvas ajustadas exponencialmente, juntamente com suas respectivas equações, apresentam coeficientes de determinação (R^2) que indicam um bom ajuste aos dados experimentais, reforçando a confiabilidade das modelagens e dos parâmetros adotados para as simulações.

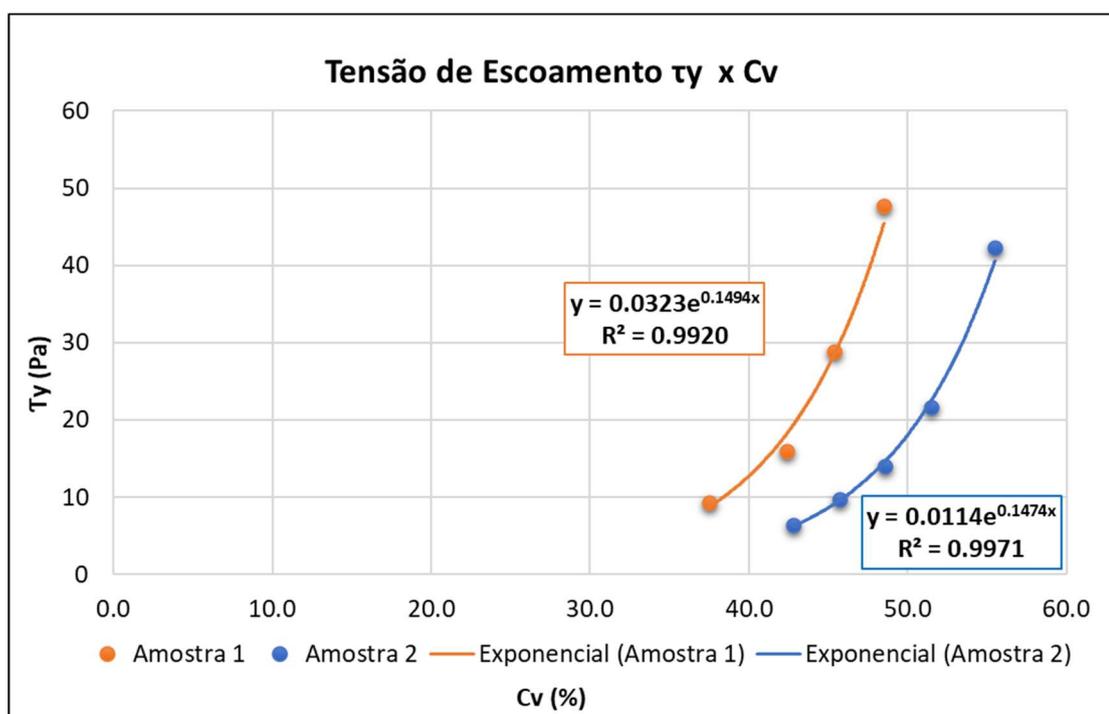


Figura 5.15 – Relação exponencial entre tensão de escoamento e concentração volumétrica das amostras
Fonte: Próprio Autor (2024)

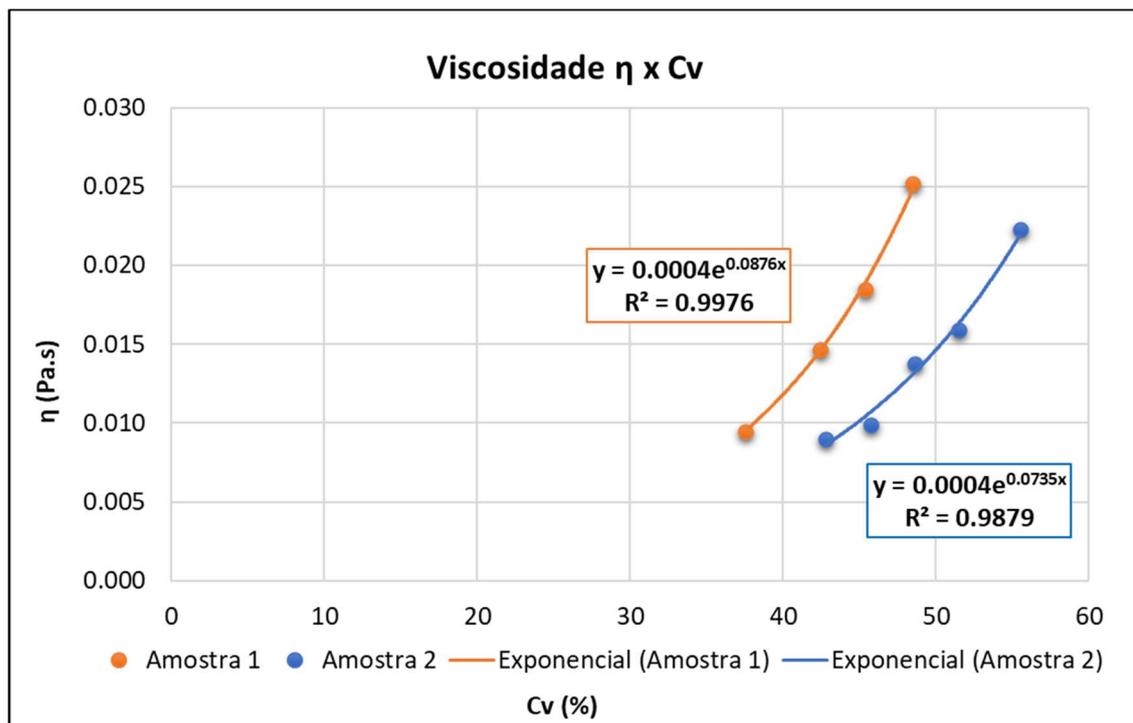


Figura 5.16 – Relação exponencial entre viscosidade e concentração volumétrica das amostras
Fonte: Próprio Autor (2024)

Além disso, observa-se uma variação substancial entre os valores de tensão de escoamento e viscosidade entre as duas amostras, mesmo quando apresentam a mesma concentração volumétrica. Esse comportamento ressalta a heterogeneidade do material armazenado, podendo impactar diretamente os resultados das modelagens numéricas de ruptura e, possivelmente, indicar a necessidade de uma nova amostragem para garantir maior precisão na caracterização do material armazenado no reservatório.

Ao comparar as amostras, observa-se que a Amostra 1 apresenta valores de tensão de escoamento consideravelmente maiores que a Amostra 2 em todas as concentrações volumétricas, com variações percentuais acima de 196%. Essa diferença se mantém relativamente constante com o aumento do CV. Já para a viscosidade, a Amostra 1 também apresenta valores maiores que a Amostra 2, mas a diferença percentual aumenta significativamente com o aumento do CV, variando de 27% para Cv de 20% a 123% para CV de 60%. Essas diferenças nas propriedades reológicas têm influência direta nos resultados hidráulicos, como será analisado nos capítulos subsequentes.

Foram gerados modelos numéricos para cada amostra, em cinco concentrações volumétricas diferentes: CV = 20%, 30%, 40%, 50% e 60%, totalizando 10 cenários de simulação. Cada modelo numérico, correspondente a um cenário específico de Cv, utiliza os parâmetros reológicos (densidade, tensão de escoamento e viscosidade) obtidos a partir das

curvas ajustadas (Figura 5.15 e Figura 5.16) para simular o escoamento da polpa ao longo do curso d'água.

A Tabela 5.7 resume os cenários simulados, apresentando os parâmetros reológicos adotados, como densidade média da polpa, tensão de escoamento e viscosidade. Esses parâmetros são fundamentais para a análise de sensibilidade, visto que a variação em suas magnitudes pode alterar significativamente os resultados da modelagem de ruptura.

Tabela 5.7 – Descrição dos cenários analisados

Cenários		Densidade média da polpa δ (kg/m ³)	Tensão de Escoamento τ_y (Pa)	Viscosidade η (Pa.s)	
Cv = 20%	20.1	Amostra 1	1257,93	0,6417	0,00205
	20.2	Amostra 2	1355,98	0,2170	0,00161
Cv = 30%	30.1	Amostra 1	1257,93	2,8596	0,00491
	30.2	Amostra 2	1355,98	0,9474	0,00336
Cv = 40%	40.1	Amostra 1	1257,93	12,7431	0,01181
	40.2	Amostra 2	1355,98	4,1354	0,00702
Cv = 50%	50.1	Amostra 1	1257,93	56,7855	0,02836
	50.2	Amostra 2	1355,98	18,0515	0,01464
Cv = 60%	60.1	Amostra 1	1257,93	253,0471	0,06813
	60.2	Amostra 2	1355,98	78,7960	0,03055

Fonte: Próprio Autor (2024)

5.10. Equação Reológica

Para a propagação da onda de ruptura utilizou-se o módulo *MUD and Tailing Flow Model* do RiverFlow2D, tendo como base a equação reológica de *Simplified Bingham*, para deslocamento de massa de fluidos não-newtonianos, que leva em consideração a viscosidade (η), a tensão de cisalhamento (τ_y) e a densidade do fluido (ρ).

Conforme apresentado no item 5.8 as amostras apresentam características viscoplásticas do tipo Bingham Simplificado. Isso significa que o fluido se comporta como um sólido até que uma tensão de cisalhamento crítica seja atingida, onde após essa tensão ocorre o fluxo do material. Dessa forma, a equação reológica de Bingham Simplificado será utilizada em todos os cenários analisados, permitindo uma avaliação consistente e precisa do comportamento do fluido sob diferentes concentrações volumétricas.

6. RESULTADOS

Este capítulo apresenta inicialmente os resultados do estudo de convergência de malha, etapa essencial para a definição do tamanho adequado da malha nas simulações subsequentes, visando o equilíbrio entre a precisão dos resultados e o tempo de processamento.

O §1º do Art. 6º da Resolução Nº 95 de 2022 da ANM estabelece os seguintes critérios para a elaboração dos mapas de inundação resultante dos estudos de ruptura de barragem:

Para as barragens de mineração com DPA médio, quando o item "existência de população a jusante" atingir 10 pontos ou o item "impacto ambiental" atingir 10 pontos no quadro de Dano Potencial Associado constante do Anexo IV, ou DPA alto, o mapa de inundação deve ser detalhado e deve exibir, em gráficos e mapas georreferenciados, as áreas a serem inundadas, os tempos de chegada da frente e do pico de onda de inundação, os níveis máximos atingidos em termos de cota e altura da onda, a velocidade máxima, o risco hidrodinâmico, a vazão máxima e o tempo de duração da fase crítica da inundação, abrangendo os corpos hídricos e possíveis impactos ambientais.

Após a definição da malha, são apresentados os resultados da análise das características hidráulicas da propagação das manchas de inundação para os 10 (dez) cenários analisados. Esses resultados são importantes para a compreensão do comportamento do fluido durante eventos de ruptura de barragens e atendem ao exigido pela Resolução Nº 95 da ANM. Os principais parâmetros observados, que fornecem informações cruciais sobre a dinâmica da inundação, incluem:

- Hidrogramas de propagação nas seções de observação;
- Tempo de chegada da frente da onda;
- Tempo de chegada da mancha máxima;
- Velocidade máxima;
- Profundidade máxima;
- Área da mancha de inundação.

O risco hidrodinâmico é determinado pela combinação entre profundidade e velocidade do fluxo, que determina a vulnerabilidade de pessoas, veículos e edificações (SMITH *et al.*, 2014). Neste sentido, a Figura 6.1 apresenta as curvas de classificação de risco baseadas nos níveis de perigo de H1 a H6 estabelecidos no Relatório Técnico 2014/07 do Water Research Laboratory (WRL), que especifica os limites críticos dessas variáveis hidrodinâmicas.

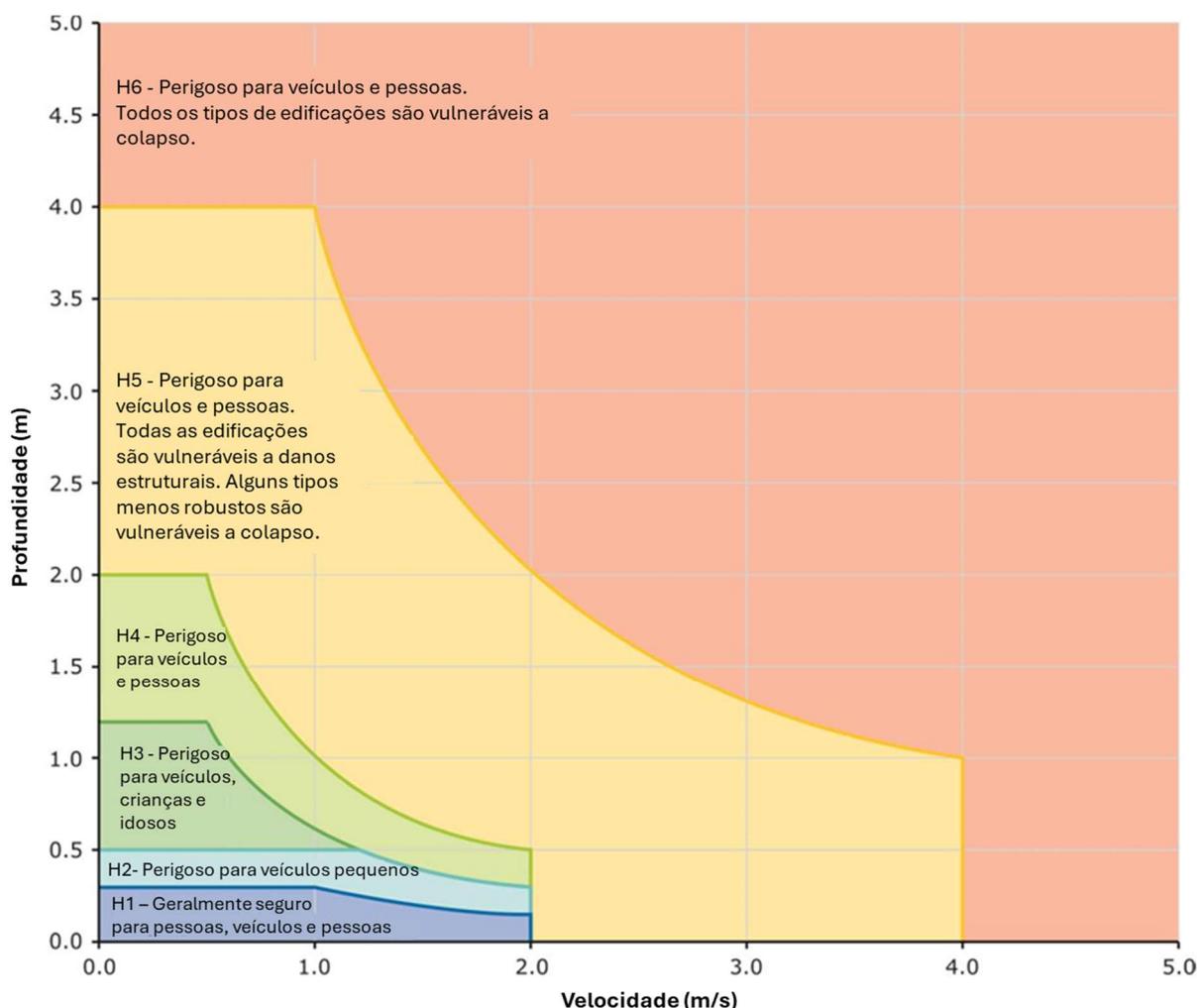


Figura 6.1 – Curva de risco hidrodinâmico
 Fonte: Traduzido de Smith et al. (2014)

Os estudos realizados não contemplam a interferência do fluxo do Rio Piracicaba no lançamento do rejeito. Essa análise exigiria uma topografia muito mais detalhada, incluindo, por exemplo, a batimetria do curso d'água, bem como informações sobre a vazão do rio. Esses dados são cruciais para compreender as características do rio e sua interação com o rejeito.

Além disso, o software adotado no estudo apresenta limitações que dificultam a modelagem da mistura dos fluxos oriundos do rejeito (água + rejeito) e da água proveniente do Rio Piracicaba. Assim, a avaliação se concentra nas dinâmicas de escoamento do rejeito, desconsiderando influências externas, como o fluxo do Rio Piracicaba, que poderiam alterar significativamente os resultados obtidos. Essa interação entre os dois fluxos pode se estender por vários quilômetros a jusante.

6.1. Resultado do estudo de convergência de malha

Com a finalidade de definir o tamanho ideal da malha triangular a ser adotado nas simulações, foi realizada o estudo de convergência de malha, considerando a variação do tamanho da malha em 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 10 m, 15 m e 20 m. A escolha desses tamanhos teve como objetivo abranger uma faixa representativa de resoluções, desde malhas mais refinadas (5 m) até malhas mais grosseiras (20 m).

A Tabela 6.1 apresenta os resultados relacionados ao tempo de processamento, tamanho do arquivo e área da mancha de inundação para cada tamanho de malha analisada.

Tabela 6.1 – Relação dos resultados para cada tamanho de malha

Tamanho da Malha (m)	Tempo de Processamento	Tamanho do arquivo (GB)	Área da Mancha de Inundação (km ²)
5	11:31	3,410	1,447
6	7:35	2,880	1,412
7	4:34	2,290	1,358
8	2:51	1,900	1,349
10	1:15	1,550	1,311
15	0:19	0,943	1,240
20	0:14	0,763	1,103

A Figura 6.2 mostra o tamanho do arquivo gerado para cada tamanho de malha. É possível perceber que à medida que a malha diminui, o tamanho do arquivo cresce exponencialmente, o que também acontece com o tempo de processamento, que aumenta significativamente. A Figura 6.3 compara o tamanho dos arquivos com os diferentes tamanhos de malha.

A Figura 6.4 mostra a área da mancha de inundação em função do tamanho da malha. É possível observar que a área de inundação tende a reduzir com o aumento do tamanho da malha, indicando uma perda de precisão nos resultados da área potencialmente afetada pela inundação. Essa redução de precisão aumenta com o tamanho da malha, atingindo valores superiores a 30% para a malha de 20 m.

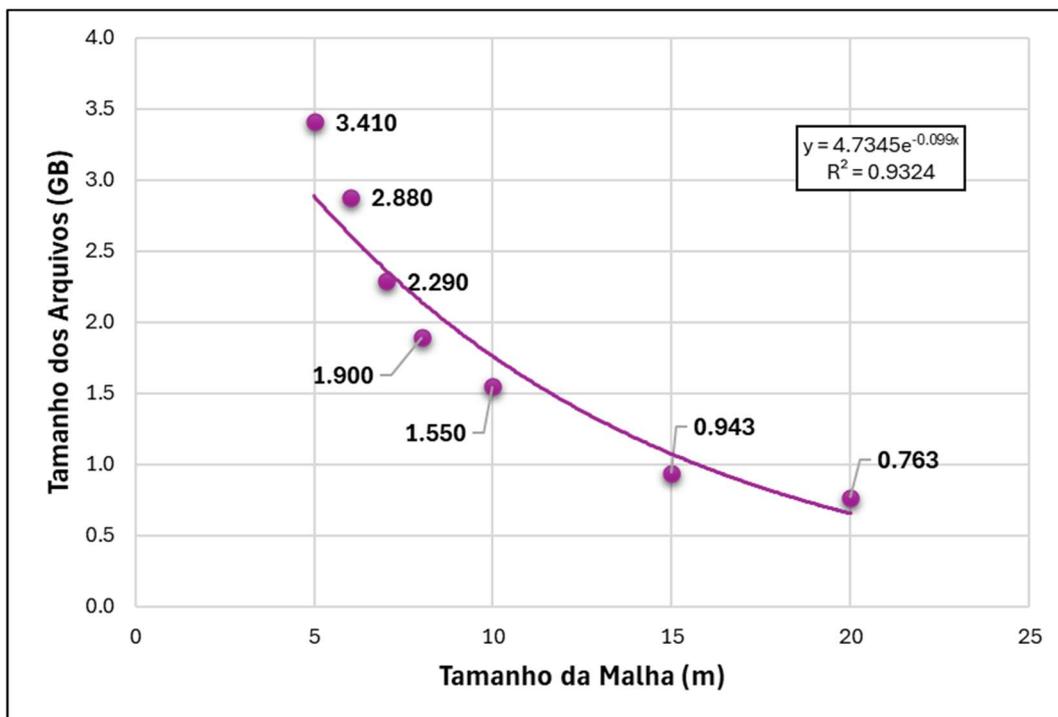


Figura 6.2 – Relação entre o tamanho da malha e o tamanho do arquivo resultante
 Fonte: Próprio autor (2024)

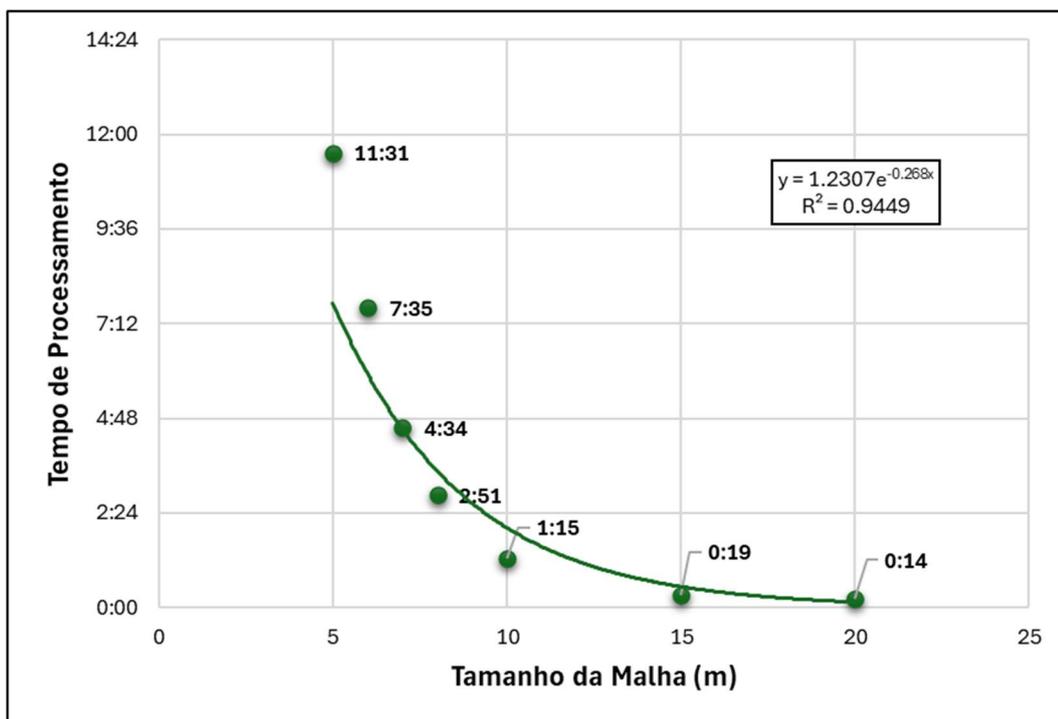


Figura 6.3 – Relação entre o tamanho da malha e o tempo de processamento
 Fonte: Próprio autor (2024)

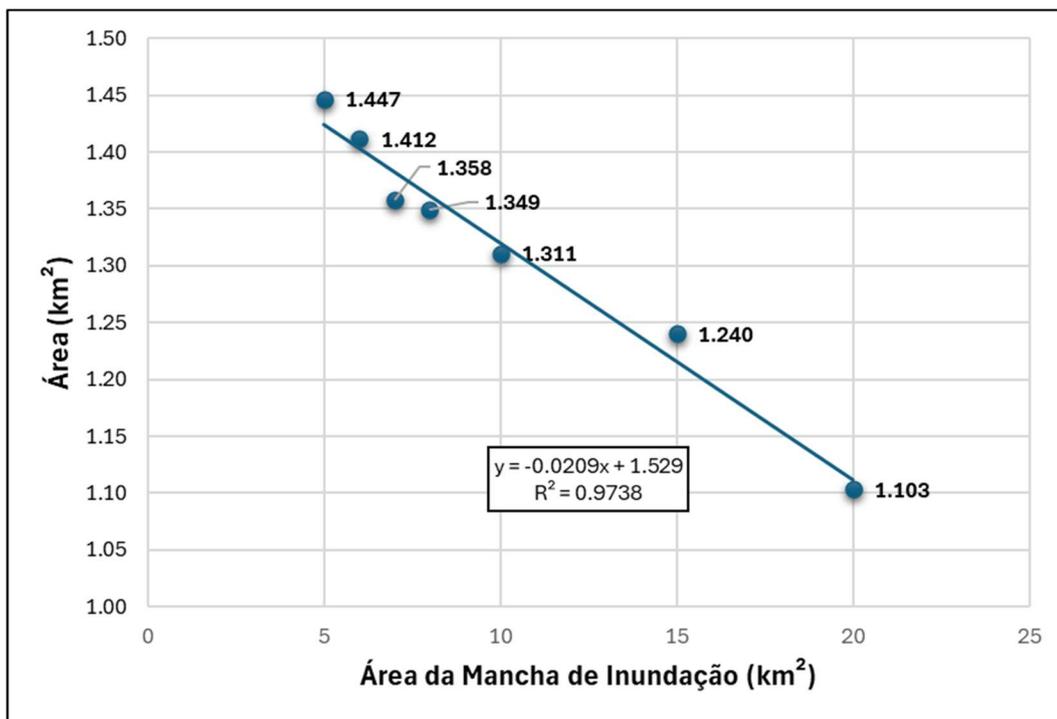


Figura 6.4 – Relação entre o tamanho da malha e a área da mancha de inundação
 Fonte: Próprio autor (2024)

A Figura 6.5 e a Figura 6.6 apresentam o tempo de chegada da frente de onda e o tempo de chegada da onda máxima, respectivamente, nas diferentes seções ao longo do curso d'água, para cada tamanho de malha. Observa-se que os tempos de chegada da onda tendem a aumentar com o tamanho da malha, indicando uma menor precisão na representação de algumas áreas potencialmente inundáveis, porém, essa relação é mais evidenciada a partir da seção 6, que está localizada a 2,93 km a jusante da barragem.

A análise da influência do tamanho da malha em simulações de rompimento de barragem no RiverFlow2D demonstrou que a escolha da malha tem um impacto significativo tanto na precisão dos resultados quanto no tempo de processamento. A malha de 5 m, apesar de ser a mais refinada, exige um tempo de processamento consideravelmente maior e gera arquivos mais extensos, o que pode ser um fator limitante em estudos com recursos computacionais restritos. Por outro lado, a malha de 20 m, embora seja a mais rápida em termos de processamento, apresenta uma redução significativa de precisão na estimativa da área de inundação.

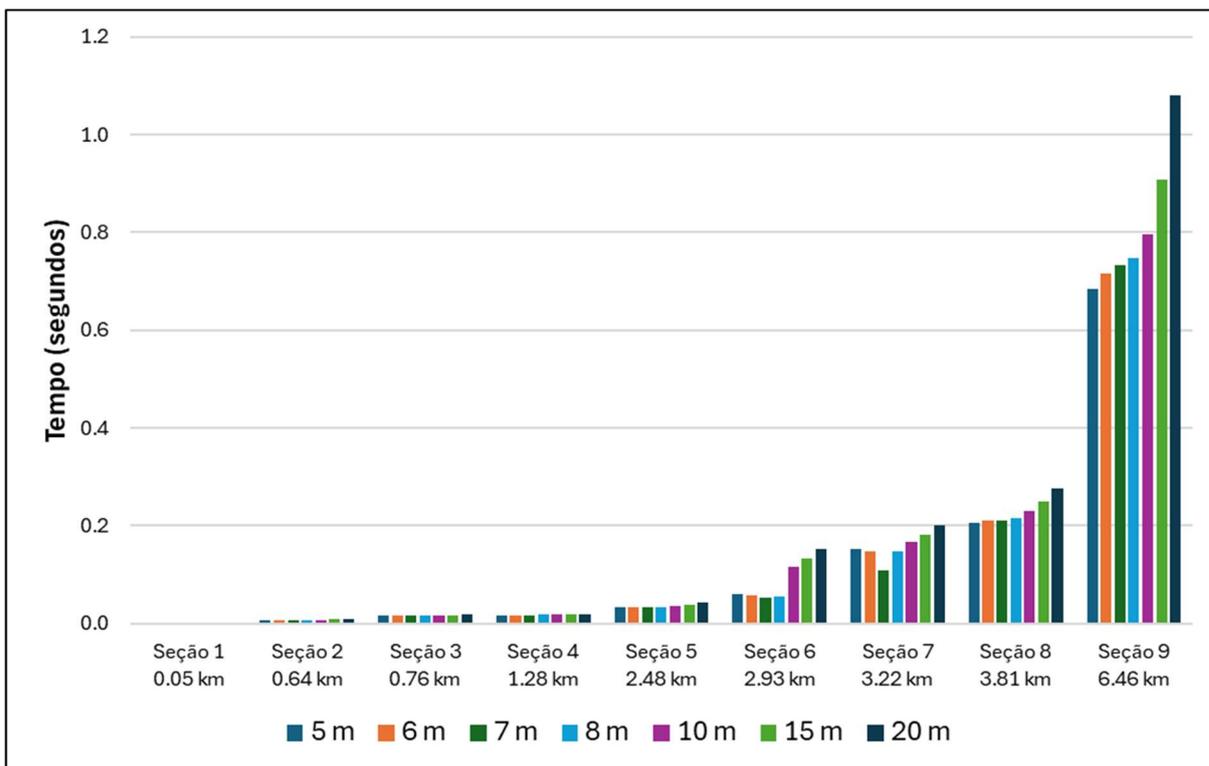


Figura 6.5 – Tempo de chegada da frente da onda em diferentes seções ao longo do curso d'água, a partir do eixo da barragem, para diversos tamanhos de malha
Fonte: Próprio autor (2024)

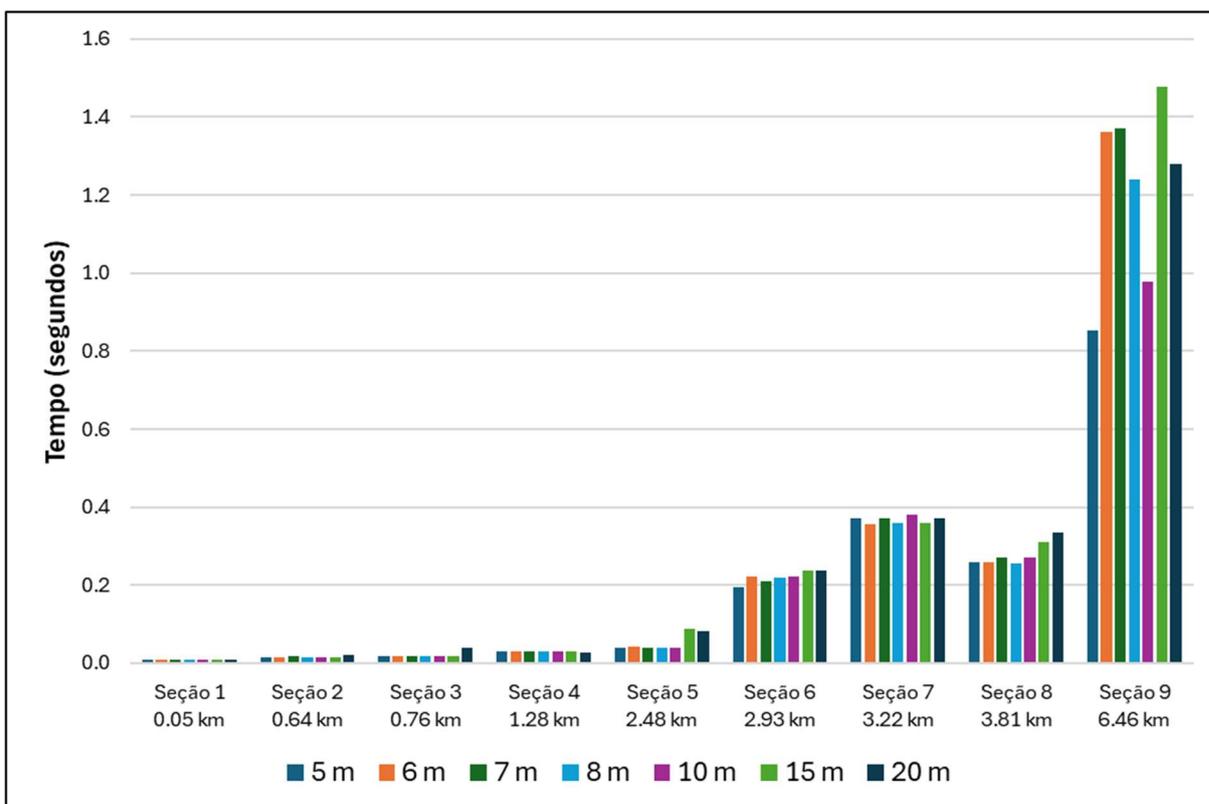


Figura 6.6 – Tempo de chegada da onda máxima em diferentes seções ao longo do curso d'água, a partir do eixo da barragem, para diversos tamanhos de malha
Fonte: Próprio autor (2024)

Considerando a necessidade de equilibrar precisão dos resultados e eficiência computacional, a malha de 10 m se mostrou a mais adequada para o estudo de convergência de malha apresentado. Ela oferece um bom ajuste entre a precisão dos resultados, com valores próximos aos da malha de 5 m, e um tempo de processamento muito menor. Portanto, a malha de 10 m, foi a escolha para os modelos que serão gerados ao longo da pesquisa, reduzindo o tempo de processamento em 10 horas e 16 min em relação à malha de 5m, sem comprometer a qualidade dos resultados.

É importante ressaltar que este estudo foi realizado com um modelo hipotético de barragem no software RiverFlow2D. Embora a malha de 10 m tenha se mostrado adequada neste caso, é fundamental realizar um estudo de convergência de malha específico para cada novo cenário a ser simulado, levando em consideração as características específicas da topografia da região, as características físicas da estrutura e os objetivos do estudo.

6.2. Análise da Propagação do Escoamento através dos Hidrogramas

No contexto do estudo de ruptura de barragens, a análise da propagação do escoamento da polpa de rejeito ao longo do tempo é crucial para prever o comportamento da onda de inundação ao longo do vale a jusante. Os hidrogramas, que representam a variação da vazão ao longo do tempo em uma determinada seção, são ferramentas essenciais para essa análise.

Este capítulo apresenta os hidrogramas das nove seções estudadas (Figura 6.7 até a Figura 6.15), mostrando os resultados em função das concentrações volumétricas consideradas para as duas amostras de polpa de rejeito de minério de ferro. A partir da análise visual dos gráficos, podem ser investigadas as tendências de propagação do escoamento e a influência das diferentes concentrações volumétricas e das propriedades reológicas das amostras.

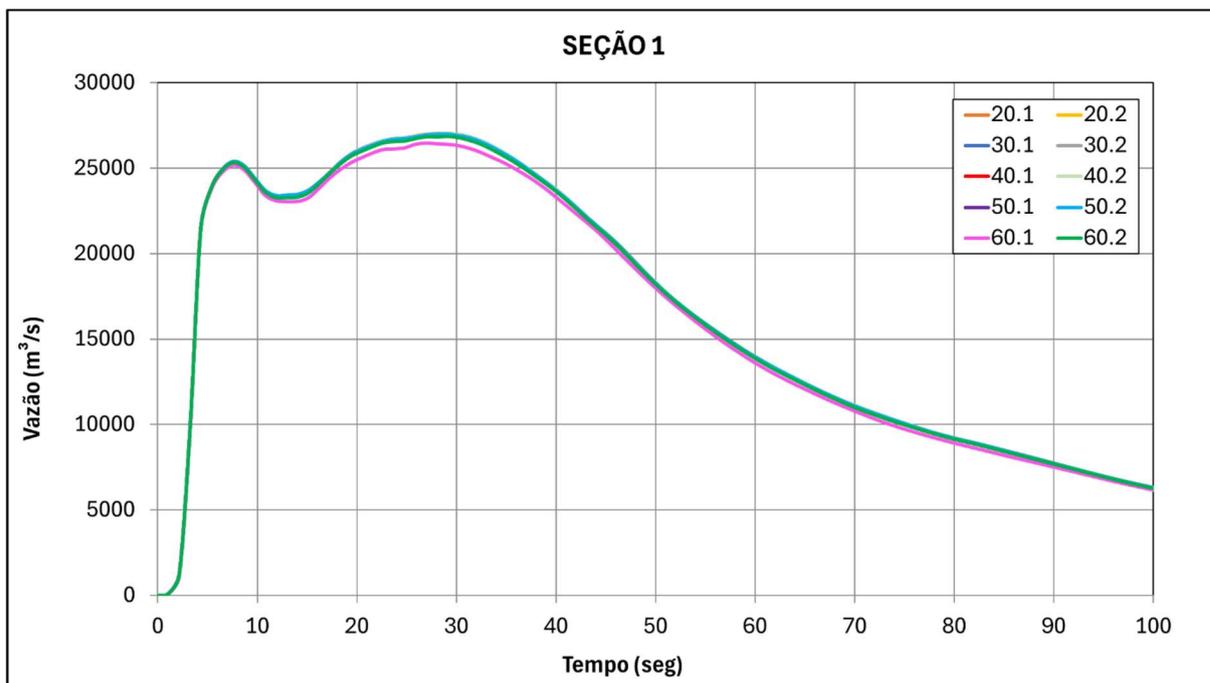


Figura 6.7 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 1 – 0,05 km
Fonte: Próprio Autor (2024)

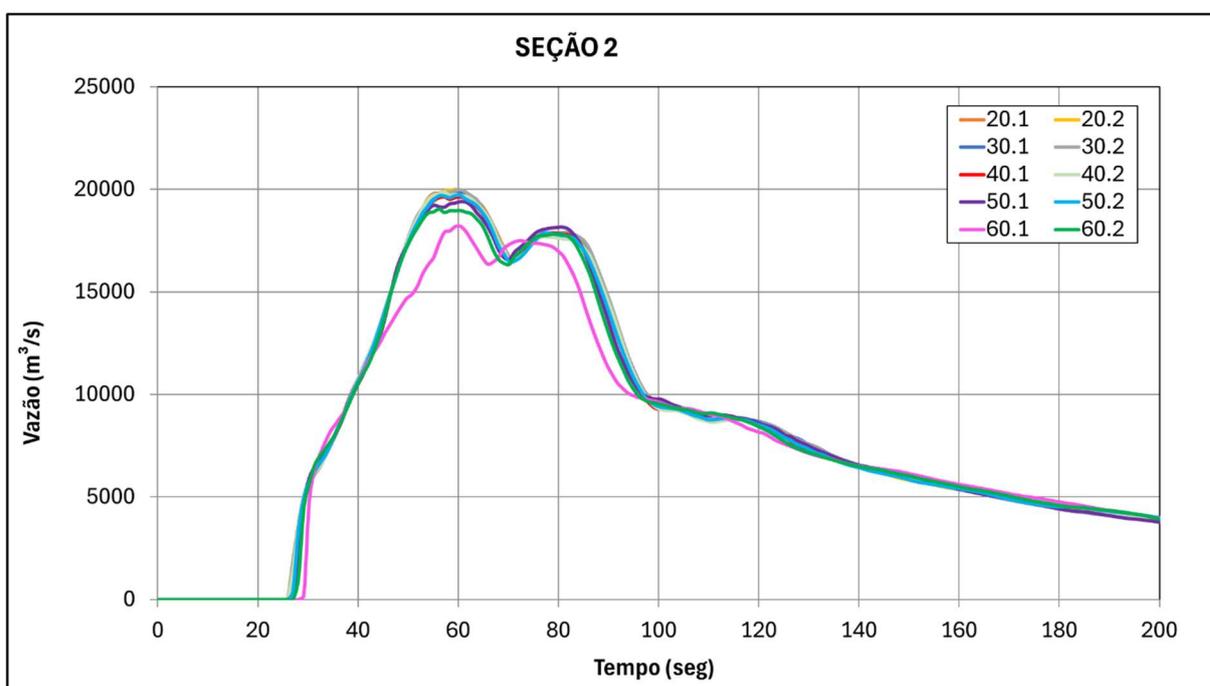


Figura 6.8 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 2 – 0,64 km
Fonte: Próprio Autor (2024)

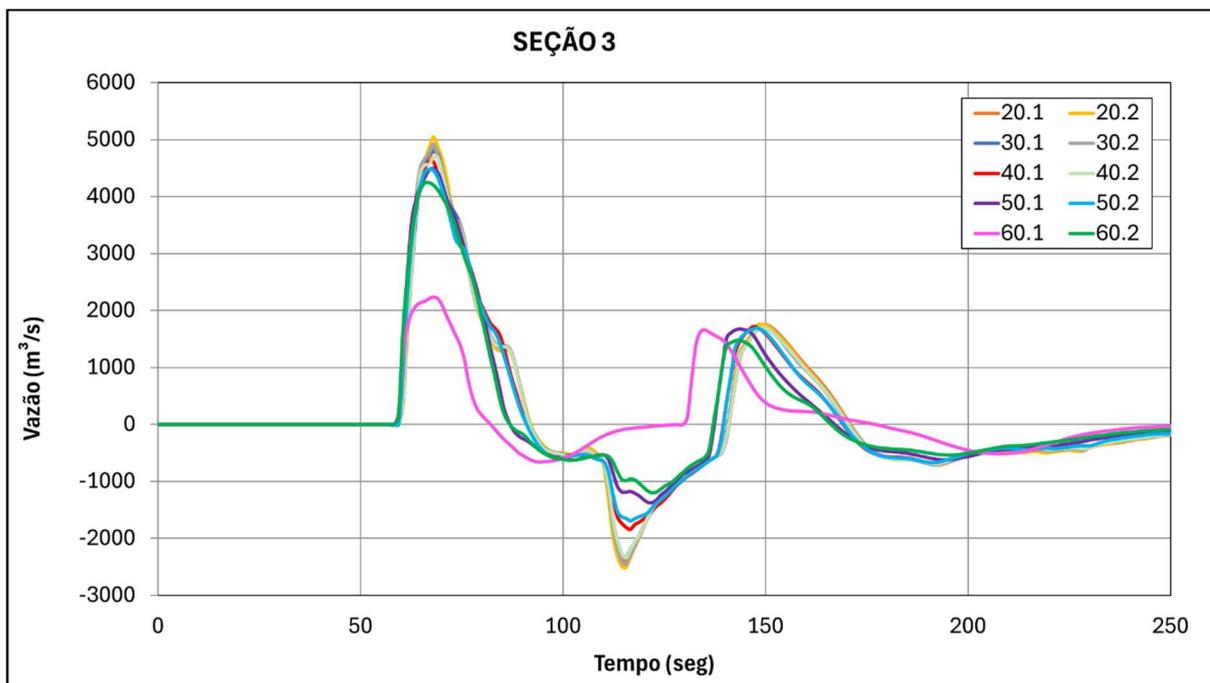


Figura 6.9 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 3 – 0,76 km
 Fonte: Próprio Autor (2024)

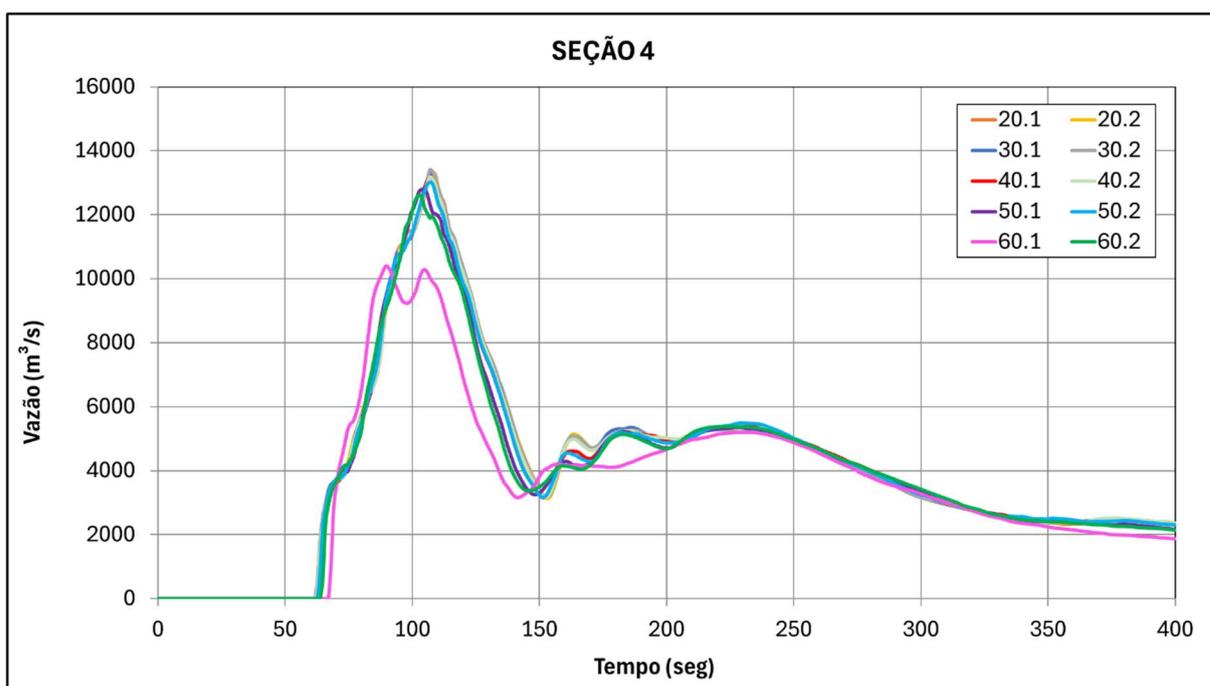


Figura 6.10 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 4 – 1,28 km
 Fonte: Próprio Autor (2024)

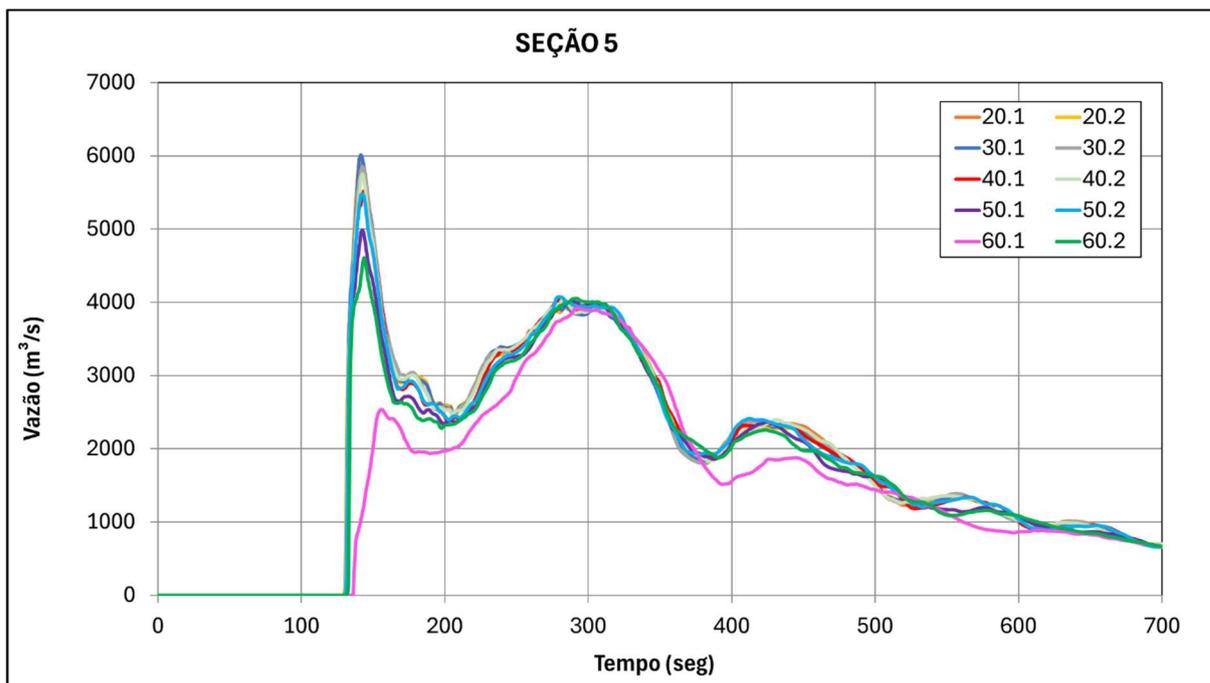


Figura 6.11 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 5 – 2,48 km
Fonte: Próprio Autor (2024)

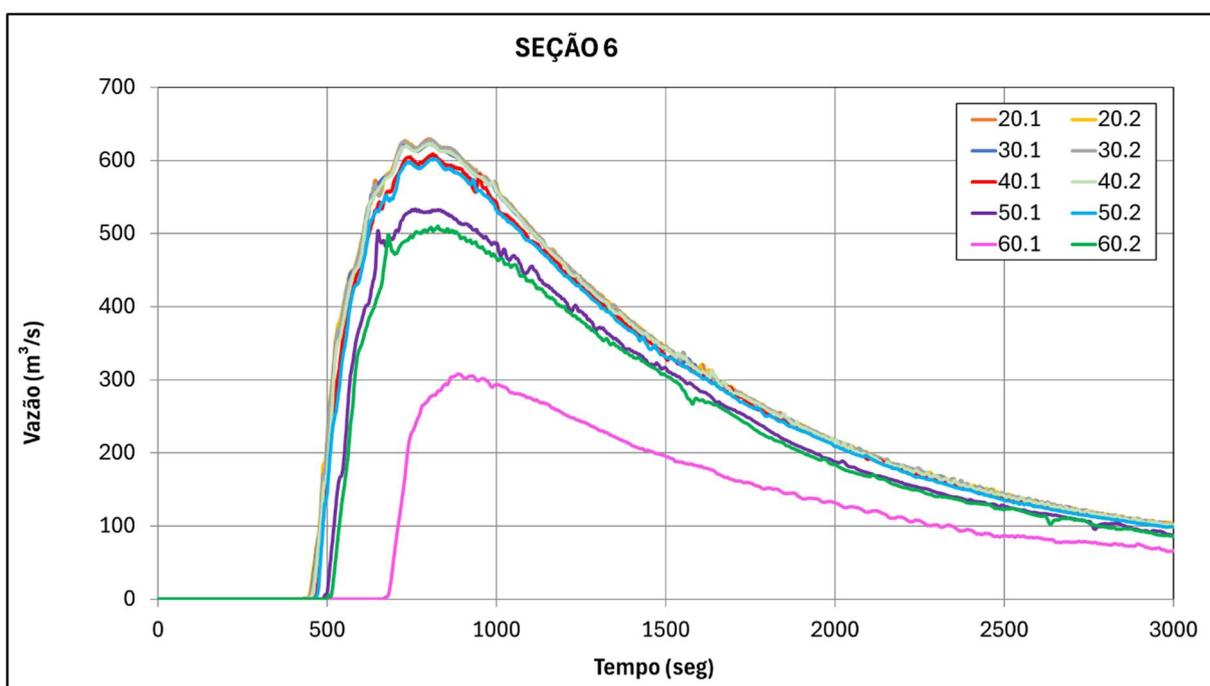


Figura 6.12 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 6 – 2,93 km
Fonte: Próprio Autor (2024)

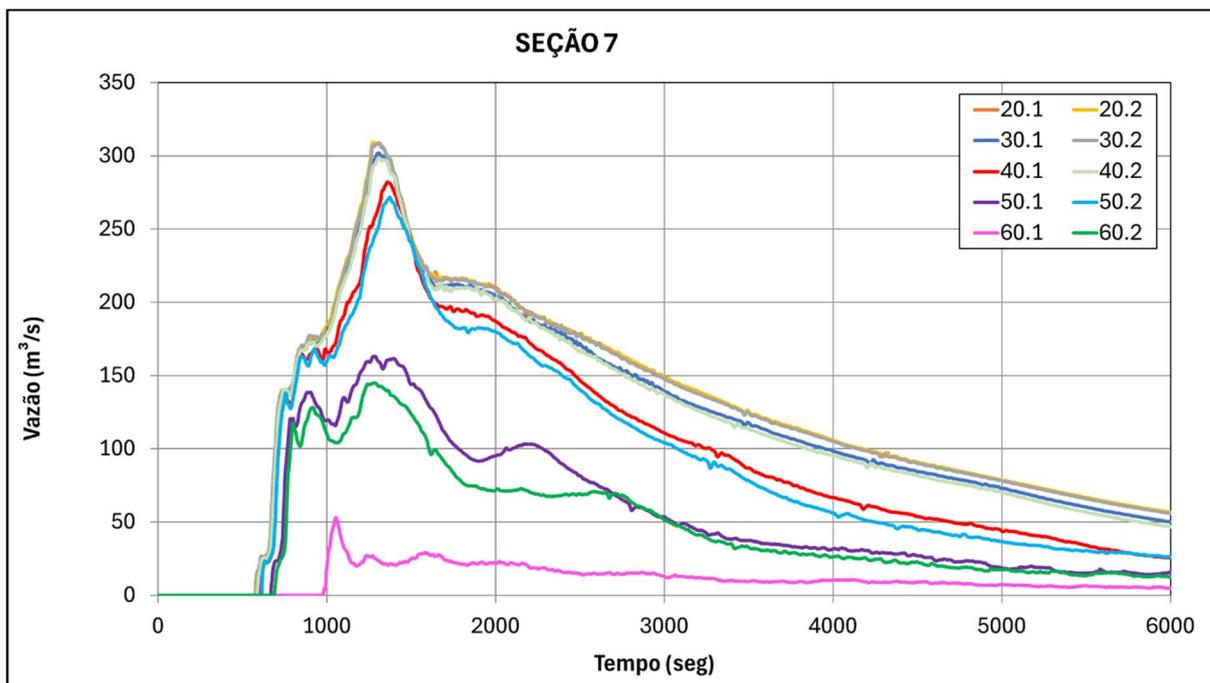


Figura 6.13 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 7 – 3,22 km
 Fonte: Próprio Autor (2024)

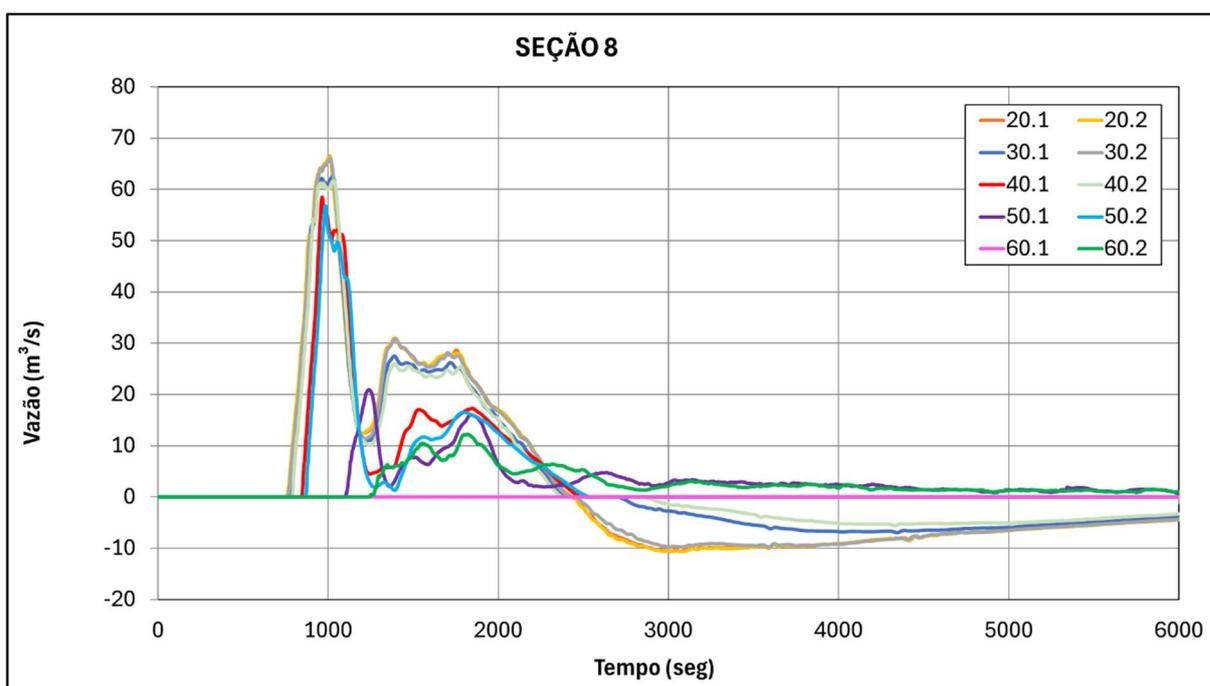


Figura 6.14 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 8 – 3,81 km
 Fonte: Próprio Autor (2024)

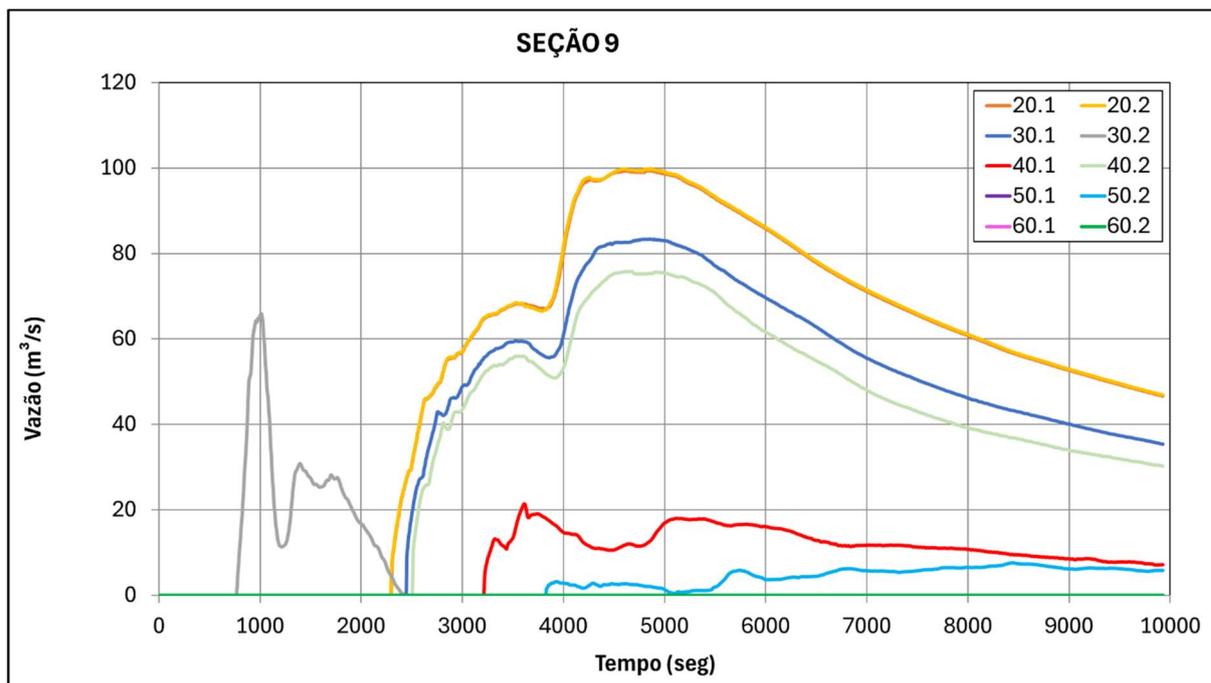


Figura 6.15 – Hidrogramas de propagação da onda na Seção 9 – 6,46 km
Fonte: Próprio Autor (2024)

A observação dos gráficos revela que, nas seções iniciais (Seções 1 a 4 – Figura 6.7 a Figura 6.10), a influência dos parâmetros reológicos nos resultados hidráulicos é mínima. Isso pode ser justificado pela rapidez com que o material se propaga no início do escoamento, além da similaridade dos parâmetros reológicos adotados. Na Seção 1, não foram observadas diferenças significativas entre os cenários analisados, exceto no cenário com 60% da Amostra 1, onde é perceptível uma pequena variação no tempo de pico e na vazão máxima. Nas Seções 2, 3 e 4, o comportamento é semelhante ao da Seção 1, com variações mínimas entre os cenários de 20% a 60% de concentração volumétrica.

Nas seções intermediárias 5 a 7 (Figura 6.11 a Figura 6.13), nota-se uma maior diferenciação entre os hidrogramas, especialmente nos modelos com 50% da Amostra 1 e 60% em ambas as amostras. Essa mudança sugere uma influência crescente das propriedades reológicas do material ao longo do curso d'água. Na seção 6, por exemplo, nota-se uma maior mudança e um afastamento dos hidrogramas, especialmente nos modelos com 50% da Amostra 1 e 60% em ambas as amostras, sugerindo uma influência do material ao longo do curso d'água. Essa diferença pode ser atribuída à maior viscosidade da Amostra 1, que retarda o escoamento e aumenta o tempo de propagação da onda.

Na Seção 8 (Figura 6.14), que representa um remanso a montante do Rio Piracicaba, a variação entre os hidrogramas é ainda maior, principalmente no retorno da onda. Essa variação pode ser explicada pelas condições específicas de fluxo e pela deposição do material.

Por fim, na Seção 9 (Figura 6.15), que é a última seção analisada, as manchas dos modelos com concentração volumétrica de 50% da Amostra 1 e 60% das duas amostras não conseguem atingir a seção. Esse resultado indica que concentrações mais elevadas de sólidos na polpa resultam em uma propagação menos efetiva da onda de inundação e maior tendência de deposição do material. A maior viscosidade e tensão de escoamento nessas concentrações aumentam a resistência ao escoamento, reduzindo a velocidade e a capacidade de transporte da polpa.

6.3. Tempos de Chegada da Frente da Onda e da Onda Máxima

Na Tabela 6.2 e na Tabela 6.3 são apresentados os valores referentes aos tempos de chegada da frente da onda e o tempo do pico da vazão, respectivamente, para todas as seções estudadas. Os resultados foram extraídos do software adotados nas simulações (RiverFlow2D) a cada segundo, isso permite uma maior sensibilidade para interpretação dos resultados.

Tabela 6.2 – Tempo de chegada da frente da onda

Seção	Tempo (segundo)									
	20%		30%		40%		50%		60%	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
2	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	28,1	27,0	29,2	28,1
3	60,5	60,5	60,5	60,5	59,4	60,5	59,4	59,4	59,4	59,4
4	61,6	61,6	62,6	61,6	62,6	62,6	63,7	62,6	68,0	64,8
5	130,7	129,6	130,7	130,7	131,8	131,8	131,8	131,8	136,1	132,8
6	408,2	407,2	409,3	409,3	421,2	413,6	469,8	427,7	639,4	484,9
7	577,8	576,7	582,1	577,8	607,0	589,7	668,5	615,6	972,0	690,1
8	760,3	758,2	778,7	764,6	845,6	789,5	1103,8	868,3	-	1246,3
9	2296,1	2290,7	2446,2	2316,6	3211,9	2505,6	-	3813,5	-	-

Fonte: Próprio Autor (2024)

Tabela 6.3 – Tempo de chegada da onda de pico máxima

Tempo (segundo)										
Seção	20%		30%		40%		50%		60%	
	Amostra 1	Amostra 2								
1	28,1	28,1	29,2	29,2	28,1	29,2	29,2	28,1	27,0	29,2
2	57,2	59,4	57,2	60,5	57,2	57,2	60,5	59,4	60,5	56,2
3	68,0	68,0	68,0	68,0	67,0	68,0	68,0	67,0	68,0	67,0
4	108,0	108,0	106,9	106,9	106,9	106,9	104,8	106,9	89,6	102,6
5	142,6	141,5	141,5	142,6	143,6	142,6	142,6	142,6	292,7	143,6
6	799,2	808,9	735,5	810,0	812,2	802,4	761,4	815,4	887,8	827,3
7	1272,2	1273,3	1305,7	1310,0	1358,6	1306,8	1286,3	1371,6	1055,2	1283,0
8	1008,7	1007,6	1026,0	1013,0	964,4	1030,3	1240,9	983,9	-	1824,1
9	4867,6	4860,0	4856,8	4867,6	3613,7	4661,3	-	8441,3	-	-

Fonte: Próprio Autor (2024)

De forma geral, observou-se que os tempos de chegada aumentaram com o acréscimo da concentração volumétrica nos modelos, especialmente nas seções mais distantes, como a Seção 9. Essa tendência é esperada, uma vez que concentrações mais elevadas podem resultar em maior viscosidade e resistência ao fluxo, retardando a propagação da frente da onda.

Ao comparar as duas amostras, constatou-se que a Amostra 1 apresentou tempos de chegada ligeiramente inferiores em relação à Amostra 2. Isso sugere que a Amostra 1 possui características que favorecem um fluxo mais rápido, possivelmente devido às suas propriedades reológica.

Nas seções 1 a 3, os tempos de chegada foram relativamente baixos, com variações mínimas entre os modelos, indicando um comportamento semelhante da frente da onda nessas seções, independentemente da concentração volumétrica e dos parâmetros reológicos. Esse comportamento é justificável, dado que as três primeiras seções estão localizadas muito próximas à barragem. A curta distância entre a ruptura e as seções faz com que a frente da onda atinja rapidamente essas áreas, com pouca influência das variações nas propriedades do fluxo.

Nas seções 4 e 5, as variações dos tempos de chegada também foram pequenas. No entanto, para o modelo com concentração volumétrica de 60%, referente à Amostra 1, percebeu-se um pequeno aumento no tempo de chegada. Nessa condição, a frente da onda demorou 6 segundos a mais para alcançar essas seções, em comparação com o modelo que apresentou o menor tempo.

A partir da seção 6, observou-se uma maior variação nos tempos de chegada entre os diferentes modelos. Essas variações se tornaram mais significativas, especialmente nos modelos com concentrações volumétricas de 50% e 60%, que possuem viscosidade e tensão de escoamento mais altos.

Nas seções 8 e 9, localizadas mais distantes da barragem, a influência da concentração volumétrica sobre o tempo de chegada da onda tornou-se ainda mais evidente. Nessas regiões, o aumento da viscosidade e da resistência ao fluxo, associados às maiores concentrações de sólidos na popa, retardaram significativamente o avanço da frente da onda. Essas informações são fundamentais para compreender o comportamento da onda em áreas mais distantes da barragem, uma vez que, em certas condições, o material pode não alcançar determinadas distâncias ao longo do curso d'água.

Vale ressaltar que o modelo numérico adotado nas simulações não contempla a mistura entre a água do Rio Piracicaba e a polpa de rejeito. Embora essa mistura ocorra na realidade, a análise desse fenômeno exige dados mais precisos, como a batimetria e a vazão do curso d'água. Além disso, os softwares atualmente disponíveis apresentam limitações para realizar essa verificação de forma mais precisa, inclusive no mapeamento do avanço dessa mistura ao longo do curso d'água.

Na Figura 6.16 e na Figura 6.17 são apresentados gráficos que mostram os tempos de chegada da frente da onda nas diferentes seções, facilitando a visualização e análise dos tempos em cada seção considerada. Além disso, a Figura 6.18 e Figura 6.19 ilustram os tempos de chegada da onda máxima, fornecendo uma perspectiva adicional sobre a dinâmica da propagação da onda em função dos cenários analisados.

Os resultados do tempo de chegada da onda de pico máxima (Tabela 5.2 e Figuras 5.12 e 5.13) refletem o momento em que a onda atinge sua altura máxima em cada uma das nove seções analisadas. Como esperado, os tempos de chegada da onda máxima variam conforme a distância da seção em relação à barragem e a concentração volumétrica adotada nos modelos.

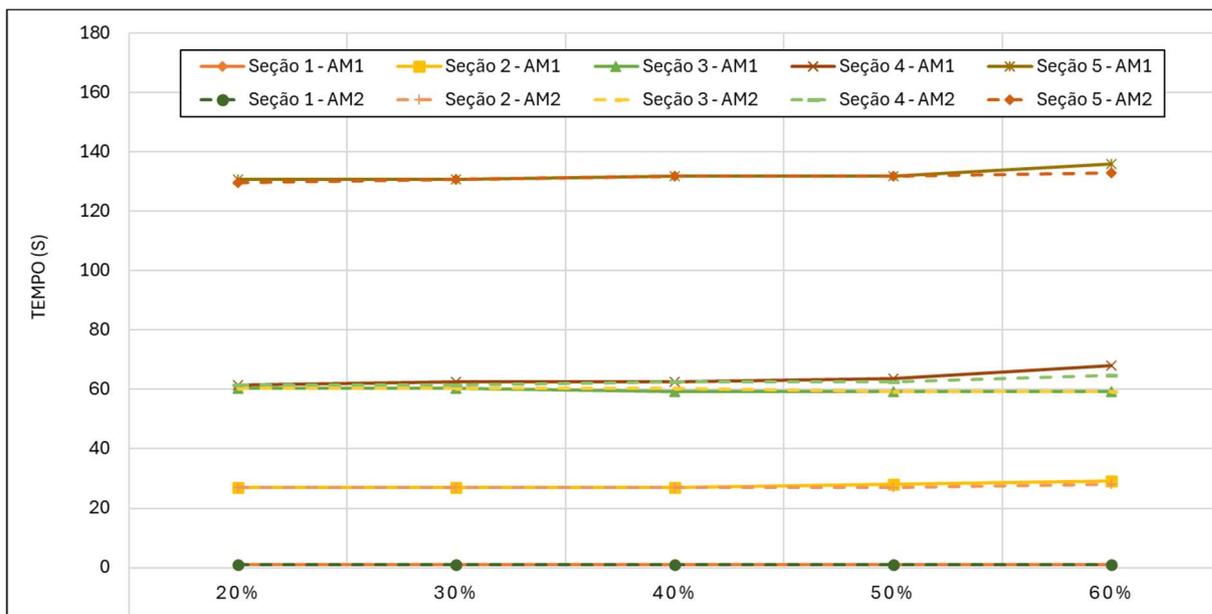


Figura 6.16 – Gráfico do tempo de chegada da onda – Seções 1 a 5
Fonte: Próprio Autor (2024)

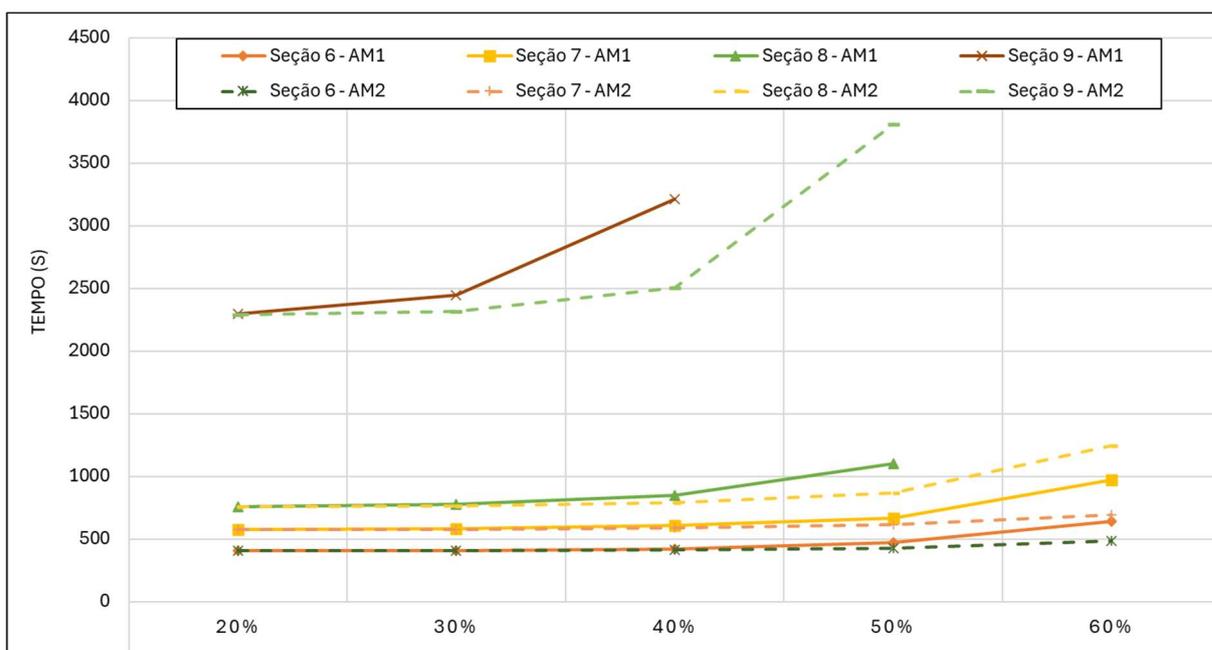


Figura 6.17 – Gráfico do tempo de chegada da onda – Seções 6 a 9
Fonte: Próprio Autor (2024)

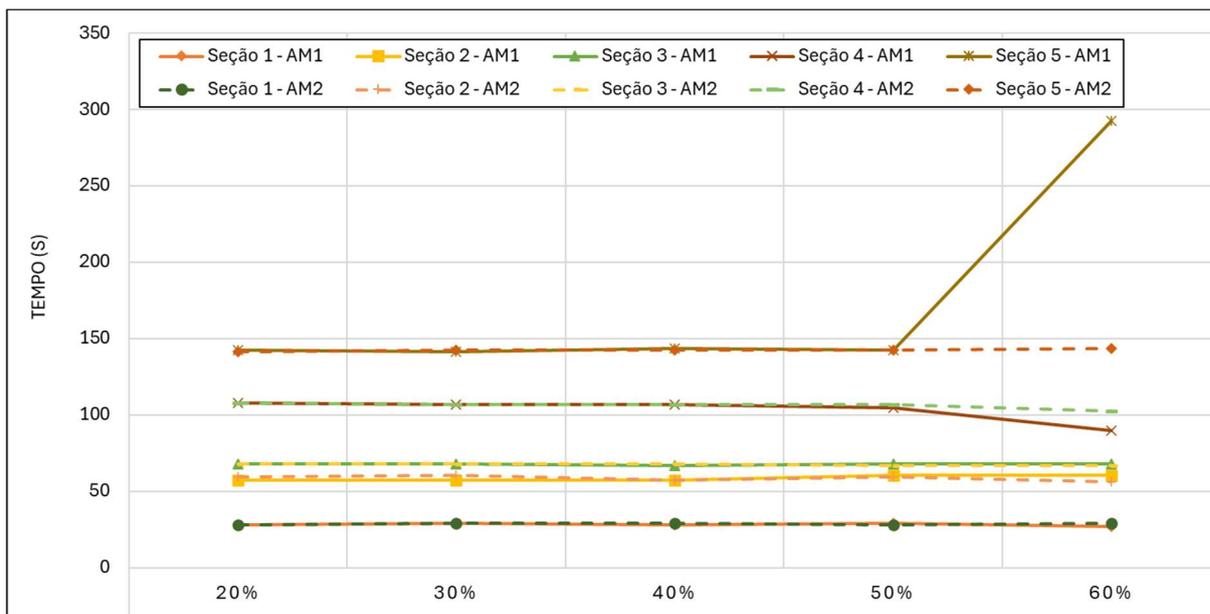


Figura 6.18 – Gráfico do tempo de chegada da onda de pico máxima – Seções 1 a 5
Fonte: Próprio Autor (2024)

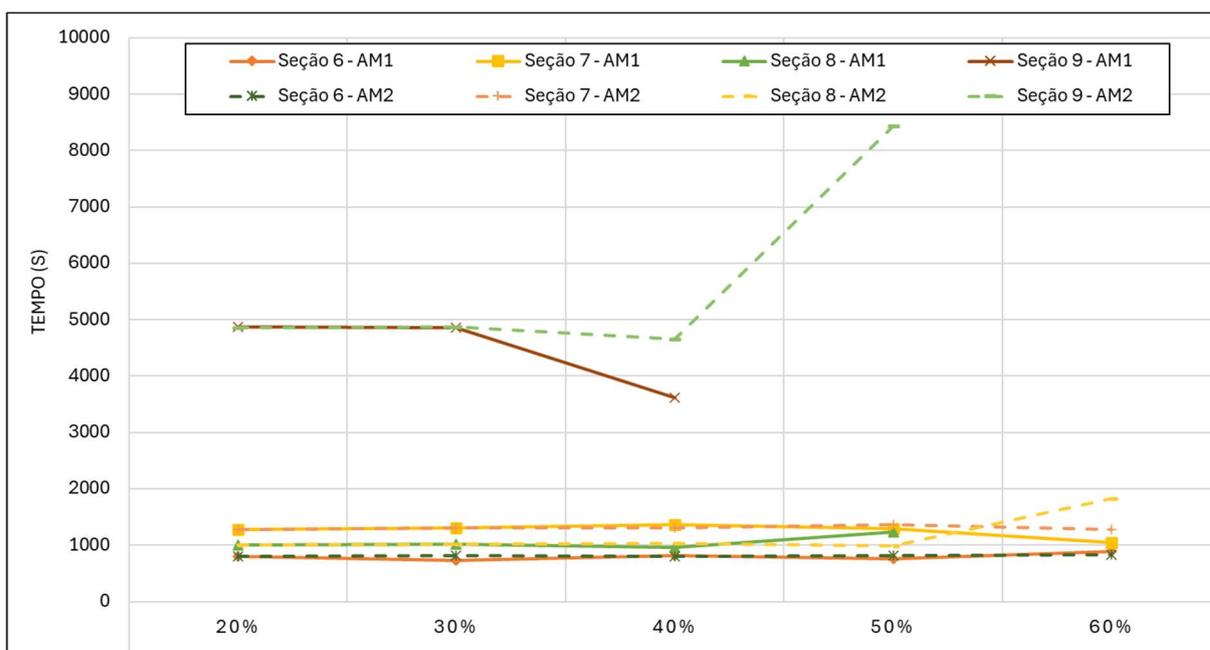


Figura 6.19 – Gráfico do tempo de chegada da onda de pico máxima – Seções 6 a 9
Fonte: Próprio Autor (2024)

Nas primeiras seções, Seções 1 a 3, próximas à barragem, os tempos de chegada da onda máxima foram relativamente baixos, com uma diferença mínima entre as diferentes concentrações e entre as duas amostras. Isso demonstra que a proximidade com a barragem resulta em um comportamento mais uniforme, com variações insignificantes tanto na frente da onda quanto no tempo em que ela atinge seu pico.

Na Seção 4 percebe-se um pequeno aumento na variação dos tempos de chegada, principalmente para a concentração de 60%, onde há uma maior diferença entre os tempos de

chegada da Amostra 1 (89,6 segundos) e da Amostra 2 (102,6 segundos). Esse comportamento indica que, com o aumento da concentração, a resistência do fluxo começa a influenciar de forma mais significativa o comportamento da onda, reduzindo sua velocidade de propagação.

Na Seção 5, ocorre uma mudança mais notável no comportamento da onda, especialmente na concentração de 60% da Amostra 1, onde o tempo de chegada da onda máxima é consideravelmente maior (292,7 segundos). Esse aumento acentuado no tempo evidencia o impacto das propriedades reológicas do material quando há concentrações mais elevadas de polpa de rejeito. A maior concentração volumétrica resulta em um aumento na viscosidade e na resistência ao fluxo, o que, por sua vez, causa uma desaceleração significativa da propagação da onda, fazendo com que ela atinja seu pico de altura muito mais tarde em comparação com as concentrações mais baixas.

Nas seções mais distantes, como as seções 6 e 7, as diferenças se tornam mais pronunciadas entre as amostras e concentrações. Na Seção 6, por exemplo, a Amostra 1 para a concentração de 60% chega em 887,8 segundos, enquanto a Amostra 2 chega em 827,3 segundos. Esse padrão continua na Seção 7, onde os tempos também diferem de maneira mais substancial entre as concentrações mais altas.

Nas seções localizadas no Rio Piracicaba, mais distantes da barragem, a influência das concentrações volumétricas torna-se ainda mais evidente, especialmente nas concentrações mais elevadas. Na Seção 9, por exemplo, os tempos de chegada para as concentrações de 50% e 60% são significativamente elevados, com a onda apresentando um comportamento mais lento e com maior dificuldade para avançar. Em concentrações como a de 60%, a onda sequer alcançou a Seção 9 dentro do período da simulação, o que sugere que, sob certas condições, a energia da onda pode ser dissipada a ponto de não conseguir atingir distâncias tão grandes.

O comportamento dos tempos de propagação da onda reflete de maneira clara o efeito crescente da concentração volumétrica nas seções mais distantes da barragem. Concentrações maiores tendem a retardar a propagação da onda, sendo que, especialmente na concentração de 60%, o tempo de chegada aumenta consideravelmente ou até impede que a onda alcance as últimas seções simuladas

Um aspecto relevante a ser destacado é a diferença nos resultados entre as Amostras 1 e 2 para as concentrações superiores a 40%, sugerindo variações nas características reológicas entre as amostras do mesmo rejeito. Isso ressalta a importância de detalhar os pontos de coleta das amostras, as profundidades de extração, a variabilidade e o volume dos rejeitos

armazenados, utilizando ferramentas de modelagem geológica-geotécnica para uma caracterização mais abrangente do material e maior precisão nos resultados. Além disso, evidencia-se que apenas duas amostras sem detalhamento são insuficientes, e, portanto, recomenda-se a coleta de outras amostras para caracterizar o rejeito com maior fidelidade, visto que essas diferenças podem ter impactos significativos na propagação da onda e nas consequências de uma eventual ruptura de barragem, uma vez que barragens de rejeito podem apresentar maior concentração de sólidos.

6.4. Análise das Velocidades Máximas de Escoamento

A velocidade de escoamento da polpa de rejeitos em caso de ruptura de barragem é um parâmetro crucial para determinar o alcance, a energia cinética e o potencial de danos do fluxo. Velocidades mais elevadas aumentam a força de arraste, o poder destrutivo e a capacidade de transportar material, intensificando os impactos sobre as áreas afetadas. Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados das simulações numéricas com o RiverFlow2D para as velocidades máximas de escoamento em cada seção estudada, considerando os cenários estudados. Os resultados serão apresentados em tabelas e gráficos e serão discutidas as tendências e variações observadas nas velocidades máximas em relação aos parâmetros de cada cenário. A análise detalhada das velocidades máximas contribui para a compreensão da dinâmica do escoamento de rejeitos e auxilia na avaliação de riscos e na tomada de decisões para mitigar os impactos de um eventual desastre. A Tabela 6.4, assim como e a Figura 6.20 e a Figura 6.21, apresentam os valores de velocidade máxima extraídos de cada seção.

Tabela 6.4 – Resultados das velocidades máximas nas seções analisadas.

Velocidade Máxima (m/s)										
Seção	20%		30%		40%		50%		60%	
	Amostra 1	Amostra 2								
1	19,10	18,98	18,98	18,98	18,97	18,98	18,95	18,97	18,88	17,71
2	26,87	26,83	26,82	26,87	26,85	26,86	26,51	26,71	26,89	26,24
3	18,54	18,78	18,31	18,60	18,77	18,31	17,59	18,14	14,42	16,93
4	23,54	23,51	23,46	23,45	23,49	23,40	23,10	23,37	20,83	22,08
5	21,59	21,56	21,52	21,44	21,19	21,26	20,56	21,06	10,95	19,12
6	5,16	5,15	5,14	5,15	5,09	5,14	4,86	5,07	3,72	4,77
7	4,43	4,45	4,42	4,44	4,52	4,39	4,58	4,62	1,71	4,59
8	2,70	2,71	2,74	2,70	2,84	2,76	1,14	2,82	-	0,66
9	2,80	2,80	2,51	2,78	1,90	2,29	-	1,54	-	-

Fonte: Próprio Autor (2024)

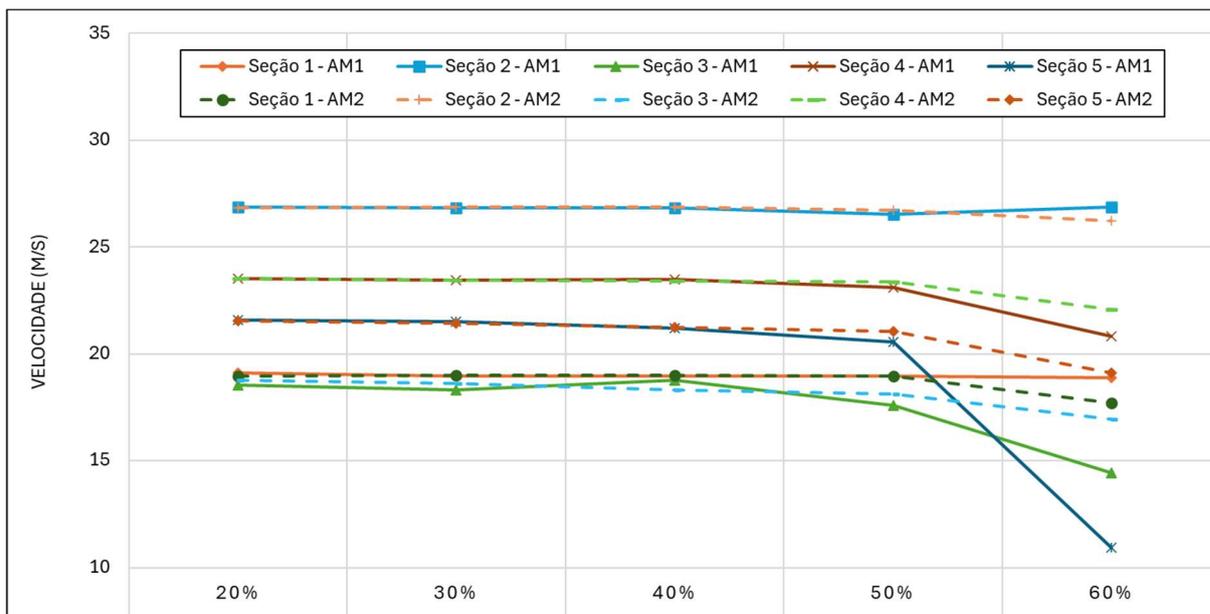


Figura 6.20 – Gráfico de velocidades máximas – Seções 1 a 5

Fonte: Próprio Autor (2024)

Observa-se pela Tabela 6.4 que as velocidades mais elevadas ocorrem nas seções 1 a 5, próximas à barragem, atingindo valores acima de 15 m/s para a Amostra 1. Nas seções 6 a 9, as velocidades são menores, indicando uma perda de energia do fluxo ao longo do curso d'água.

Na Seção 1 a velocidade média é praticamente idêntica entre as concentrações mais baixas (30% a 40%), com variações mínimas entre os valores máximo e mínimo. É possível identificar alterações significativas somente nos cenários com concentrações volumétricas a 60%.

Na Seção 2, a velocidade máxima varia de 26,89 m/s para a Amostra 1 e 26,24 m/s para a Amostra 2, ambos referente ao CV=60%. Apresenta variações mínimas entre as demais concentrações, que tem velocidade máxima média de 26,74 m/s.

Nas seções 3 a 5, as velocidades máximas também apresentam pequenas variações entre as concentrações, assim como na Seção 2, a maior diferença está nos resultados para a concentração de sólidos de 60% da Amostra 1. Na Seção 5, por exemplo, a velocidade varia de 10,95 m/s (CV=60%) a 21,59 (CV= 20%), referente à Amostra 1. Para o CV=60% a velocidade para Amostra 1 é de 10,95 m/s e na Amostra 2 a velocidade é de 19,12 m/s, onde a velocidade máxima da amostra é 75% superior se comparada com a Amostra 1. Essa diferença significativa na velocidade pode estar relacionada com a influência da viscosidade e da tensão de escoamento, que aumentam consideravelmente para a Amostra 1 em concentrações mais elevadas.

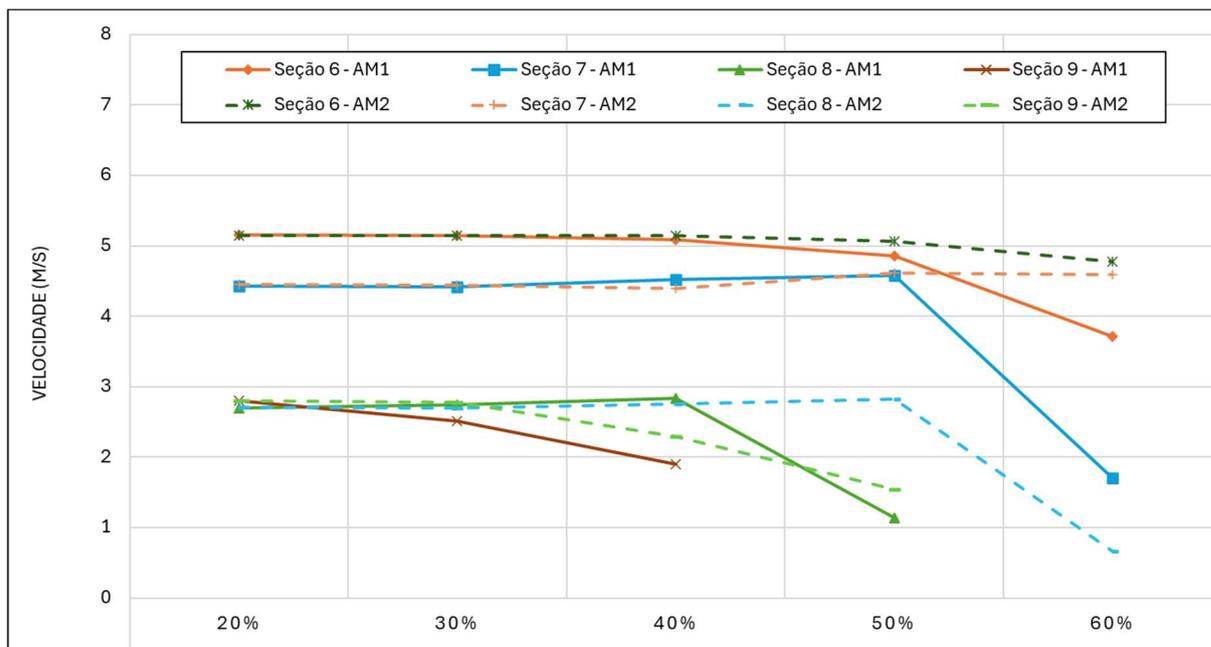


Figura 6.21 – Gráfico de velocidades máximas – Seções 6 a 9
Fonte: Próprio Autor (2024)

As velocidades nas seções 6 a 9 são menores do que nas seções anteriores, indicando uma perda de energia do fluxo ao longo do curso d'água. A partir da Seção 6 há uma queda considerável nas velocidades. No entanto, mesmo com essas quedas, as variações para concentrações de até 40% permanecem pequenas. Entretanto, a partir dos cenários com concentrações volumétricas a partir de 50% é possível observar uma maior variação.

Já na Seção 9, a diferença começa a ser perceptível a partir das concentrações volumétricas de 40%. Nesse contexto, é possível identificar uma maior influência dos parâmetros reológicos na modelagem, com a redução da velocidade indicando que o fluido está encontrando maior resistência e, portanto, perdendo velocidade. Essa redução da velocidade na Seção 9 pode estar relacionada com o aumento da viscosidade e da tensão de escoamento em concentrações mais elevadas, o que dificulta o escoamento e aumenta a tendência de deposição do material, dada que essa seção é a mais distante da barragem. Em alguns casos, o fluxo de rejeito não alcança a Seção 9, o que evidencia a influência da reologia na propagação do escoamento.

Verifica-se que, para concentrações volumétricas de até 40%, as velocidades máximas entre as amostras e ao longo das seções permanecem muito próximas entre si. A velocidade máxima não apresenta variações bruscas entre essas concentrações, mantendo-se praticamente constante nas seções iniciais e reduzindo-se de forma gradual nas seções mais distantes. Esse comportamento similar pode ser atribuído ao fato de que, nessas concentrações, o rejeito ainda

se comporta de forma relativamente fluida, com efeitos mínimos da viscosidade e da tensão de escoamento.

Para fins de comparação, a seguir são apresentados os gráficos das velocidades máximas nas seções analisadas para as concentrações volumétricas de 20% (Figura 6.22), 30% (Figura 6.23) e 40% (Figura 6.24), 50% (Figura 6.25) e 60% (Figura 6.26) considerando as duas amostras.

Estes resultados reforçam a ideia de que, apesar das diferentes concentrações volumétricas (20%, 30%, 40%), as velocidades máximas ao longo das seções permanecem semelhantes, com variações observadas sendo irrelevantes no contexto de escoamento de rejeitos em barragens, apresentando velocidades elevadas nas seções iniciais e uma queda gradual ao longo do curso d'água, sem impactos significativos causados pelo aumento de concentração entre os cenários analisados.

As análises realizadas demonstram que as duas amostras de rejeitos apresentaram comportamentos hidráulicos distintos, especialmente para concentrações volumétricas superiores a 40%, onde ocorre o aumento de sólidos e maior interferência dos parâmetros reológicos. A partir dos dados reológicos adotados em cada cenário, pode-se verificar que a Amostra 1, em todas as concentrações volumétricas (CV) analisadas, apresentou valores de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidade (η) mais elevados que a Amostra 2, o que indica maior resistência ao escoamento.

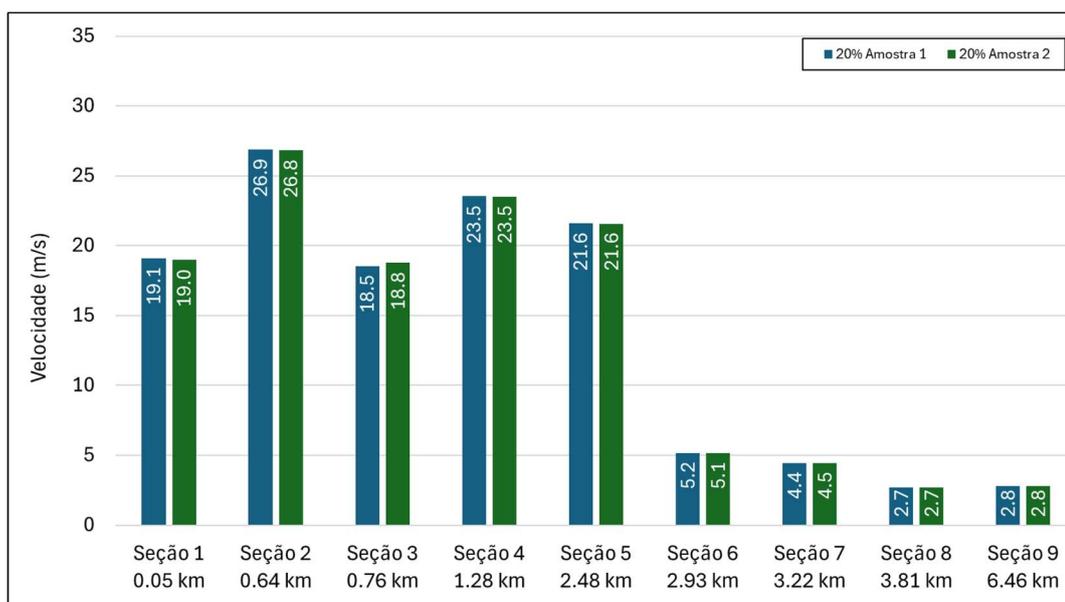


Figura 6.22 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 20%

Fonte: Próprio Autor (2024)

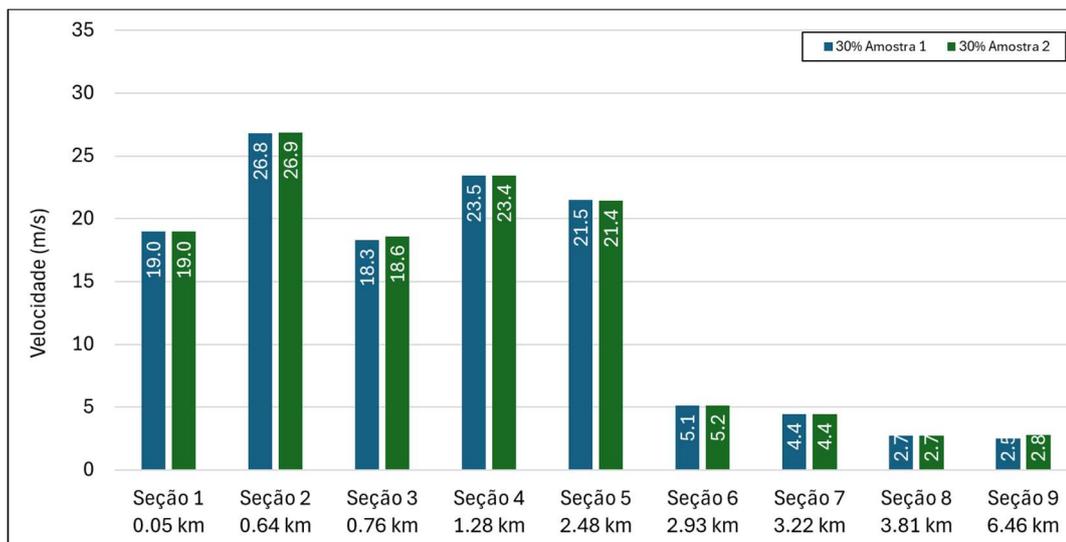


Figura 6.23 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 30%

Fonte: Próprio Autor (2024)

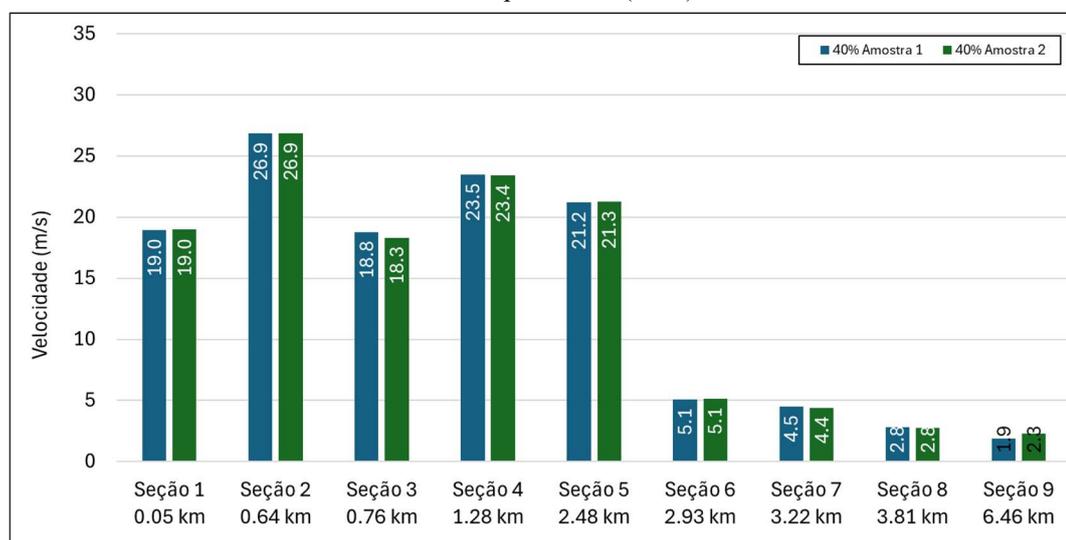


Figura 6.24 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 40%

Fonte: Próprio Autor (2024)

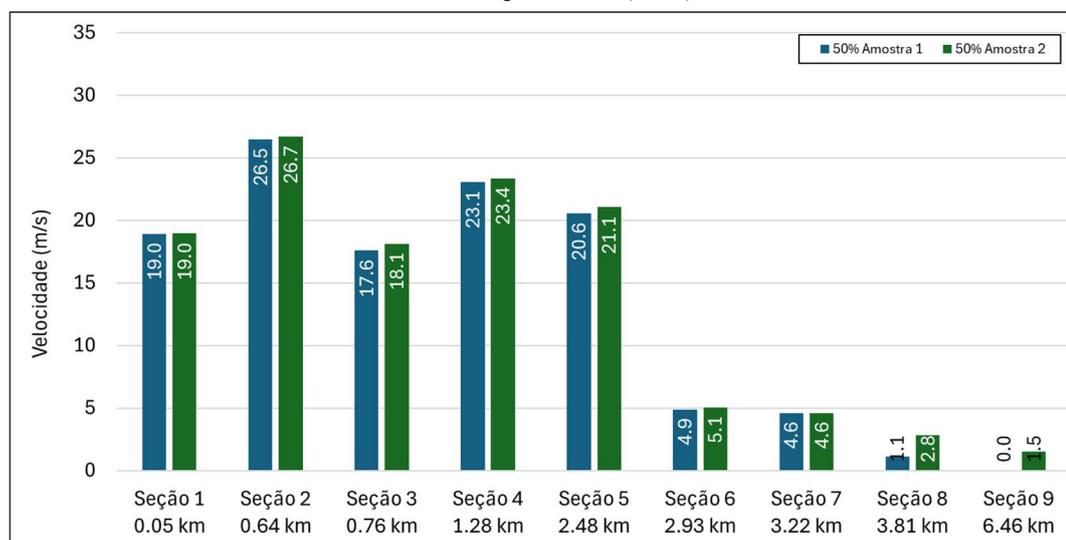


Figura 6.25 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 50%

Fonte: Próprio Autor (2024)

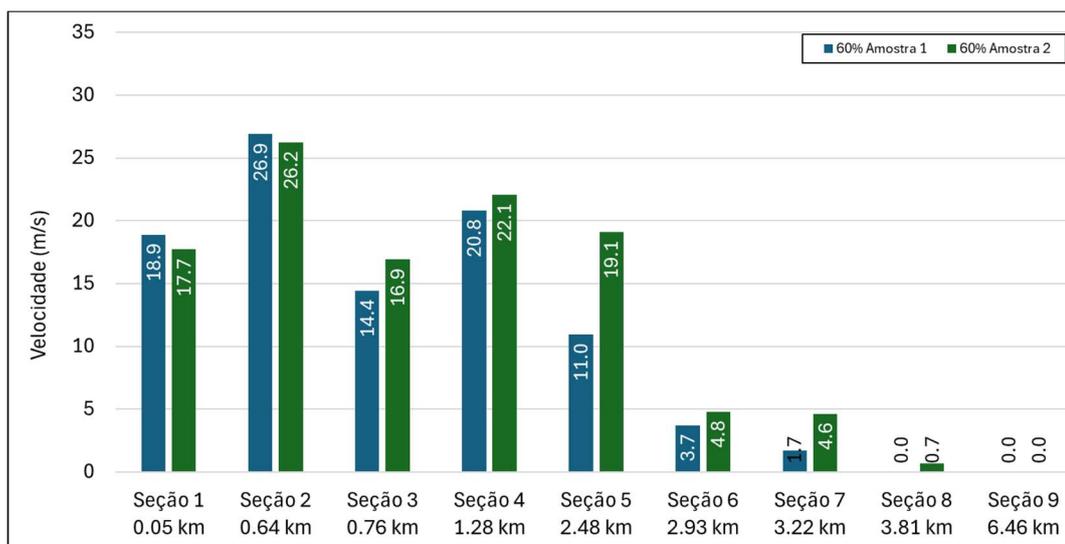


Figura 6.26 – Gráfico de velocidades máximas – CV = 60%

Fonte: Próprio Autor (2024)

Na concentração igual a 20%, por exemplo, a Amostra 1 apresentou uma tensão de escoamento de 0,6417 Pa e viscosidade de 0,00205 Pa.s, enquanto a Amostra 2, com valores inferiores, apresentou uma tensão de 0,2170 Pa e viscosidade de 0,00161 Pa.s, refletindo um comportamento mais fluido já nas concentrações mais baixas.

Ao analisar as concentrações volumétricas superiores, como a de 30%, a diferença continua a se acentuar. A Amostra 1 apresentou uma tensão de escoamento de 2,8596 Pa e viscosidade de 0,00491 Pa.s, enquanto a Amostra 2 manteve uma tensão de 0,9474 Pa e viscosidade de 0,00336 Pa.s. Esses dados reforçam que a Amostra 1 exige maior esforço para iniciar o escoamento e possui uma viscosidade mais elevada, o que implica em maior resistência ao fluxo.

Na concentração de 40%, ponto crítico de comparação entre as amostras, a Amostra 1 apresentou uma tensão de escoamento de 12,7431 Pa e viscosidade de 0,01181 Pa.s, enquanto a Amostra 2 apresentou 4,1354 Pa e 0,00702 Pa.s de tensão e viscosidade, respectivamente. Esses resultados corroboram que, embora ambas as amostras aumentem sua resistência ao escoamento com o aumento da concentração de sólidos, a Amostra 1 continua a apresentar uma resistência significativamente maior.

Nas concentrações de 50% e 60%, essa tendência se intensifica. A Amostra 1, na CV de 60%, alcançou uma tensão de escoamento de 253,0471 Pa e viscosidade de 0,06813 Pa.s, enquanto a Amostra 2, em comparação, teve uma tensão de 78,7960 Pa e viscosidade de 0,03055 Pa.s, demonstrando um comportamento mais fluido, mesmo sob concentrações mais elevadas.

Nas seções intermediárias, até a CV de 40%, o comportamento das amostras foi mais semelhante, com pequenas variações nas velocidades, o que indica um equilíbrio entre viscosidade e tensão de escoamento em ambas as amostras. Contudo, a partir de 50%, as diferenças se tornam mais evidentes, com a Amostra 2 superando a Amostra 1 em termos de velocidade de escoamento, especialmente em concentrações maiores.

Essas análises confirmam que a Amostra 1 apresenta maior resistência ao fluxo à medida que a concentração de sólidos aumenta, evidenciada pelos valores mais elevados de tensão de escoamento e viscosidade. Por outro lado, a Amostra 2, embora também mostre um aumento nessas propriedades com o incremento de sólidos, mantém um comportamento mais fluido se comparada com a Amostra 1. Como também, esses resultados destacam a importância de considerar a heterogeneidade dos materiais e as variações nas propriedades físicas e químicas de um reservatório.

A análise de apenas duas amostras pode ser insuficiente para uma caracterização completa do rejeito armazenado, especialmente em reservatórios de grandes proporções. Esses resultados corroboram com as tendências observadas nas análises de tempo e vazão apresentadas nos capítulos anteriores, reforçando a necessidade de estudos mais abrangentes para uma compreensão detalhada do comportamento reológico dos rejeitos em diferentes condições.

6.5. Análise das Profundidades Máximas de Escoamento

A análise das profundidades máximas de escoamento é crucial no estudo de ruptura de barragens, pois esse parâmetro influencia diretamente na propagação da onda de rejeito e na extensão da área afetada. Neste capítulo, com base nos cenários de simulação supracitados, serão apresentados os resultados obtidos para as profundidades máximas em cada seção estudada, considerando diferentes concentrações volumétricas. Os resultados serão apresentados em tabelas e gráficos e serão discutidas as tendências observadas para cada cenário.

Quanto maior a profundidade do escoamento, maior pode ser a resistência ao fluxo ou a interferência causada pela topografia local. Essa relação ocorre porque, em áreas com maior profundidade, o fluxo tende a sofrer mais atrito nas bordas laterais e no leito, além de ser influenciado por irregularidades topográficas, o que pode modificar a distribuição das velocidades e a capacidade de transporte do rejeito. Compreender a influência da profundidade

máxima do escoamento é essencial para prever o comportamento da polpa de rejeito em caso de ruptura da barragem, identificar áreas de risco e aprimorar as medidas de segurança.

A Tabela 6.5 apresenta as profundidades máximas para cada seção sob concentrações volumétricas, que varia de 20% a 60%. De forma geral, observa-se que as profundidades máximas tendem a aumentar com o aumento da concentração volumétrica, o que pode ser atribuído à maior resistência ao escoamento e à capacidade de transporte do fluido com maior concentração de sólidos. Além disso, as profundidades tendem a reduzir conforme se distância da barragem.

Tabela 6.5 – Resultados das profundidades máximas nas seções analisadas

Profundidade Máxima (m)										
Seção	20%		30%		40%		50%		60%	
	Amostra 1	Amostra 2								
1	34,17	34,16	34,15	34,16	34,16	34,15	34,12	34,16	34,03	34,11
2	15,47	15,46	15,42	15,45	15,19	15,44	14,64	15,04	10,82	14,56
3	10,33	10,34	10,25	10,24	10,23	10,25	10,06	10,17	9,76	9,73
4	14,02	14,06	14,10	14,11	14,06	14,20	14,33	14,17	13,41	14,78
5	21,34	21,34	21,32	21,34	21,27	21,34	21,09	21,24	20,60	21,06
6	4,85	4,84	4,84	4,85	4,80	4,84	4,59	4,78	5,40	4,78
7	4,50	4,50	4,54	4,51	4,70	4,55	5,99	4,76	5,78	6,17
8	3,22	3,22	3,20	3,22	3,17	3,20	3,85	3,16	-	3,82
9	1,93	1,93	1,89	1,93	1,72	1,87	-	1,46	-	-

Fonte: Próprio Autor (2024)

A Figura 6.20 e a Figura 6.21, mostram de forma gráfica os resultados das profundidades máximas em cada seção, tendo sido separado em duas em virtude da ordem de grandeza das velocidades para possibilitar melhor visualização.

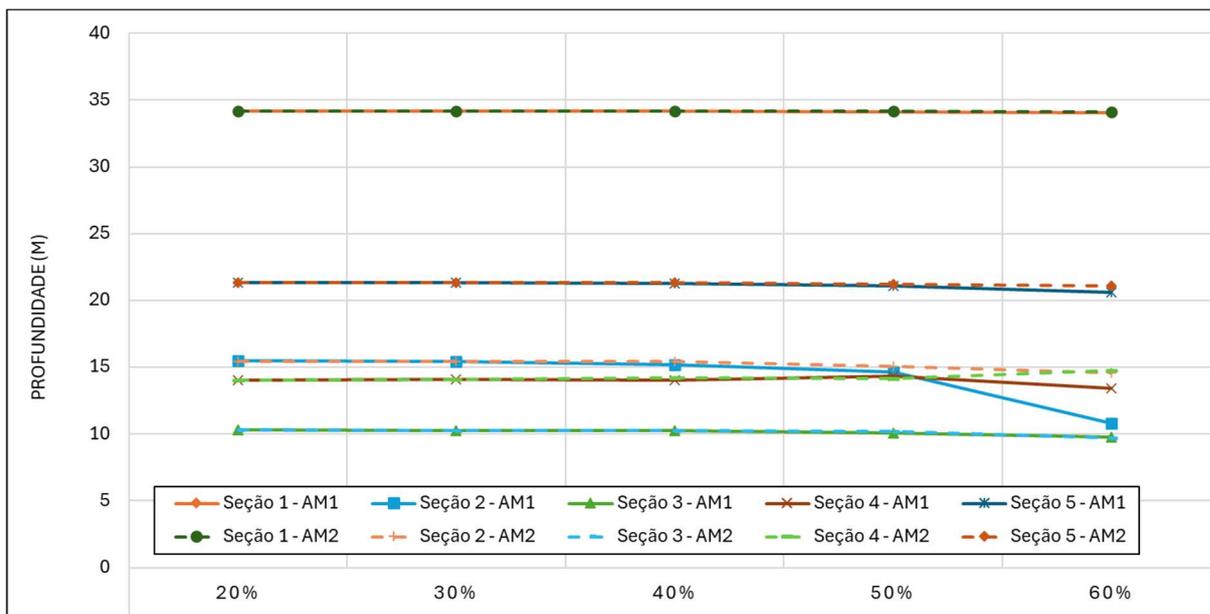


Figura 6.27 – Gráfico de profundidades máximas – Seções 1 a 5

Fonte: Próprio Autor (2024)

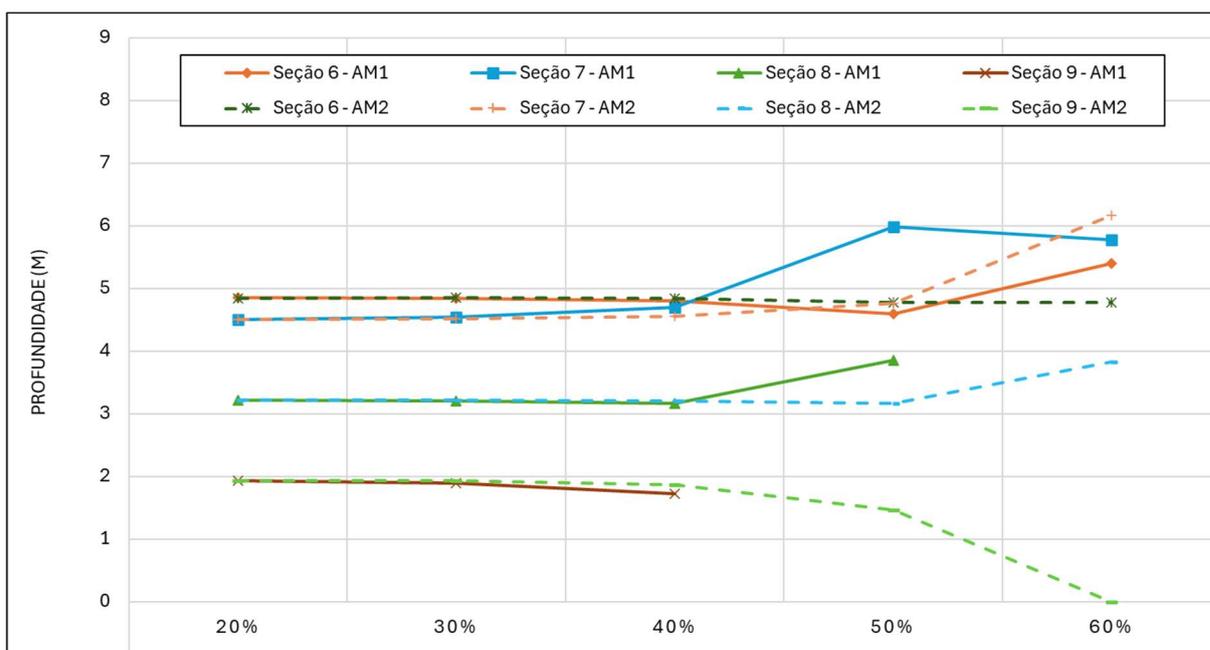


Figura 6.28 – Gráfico de profundidades máximas – Seções 6 a 9

Fonte: Próprio Autor (2024)

Na Seção 1 a profundidade máxima mantém-se relativamente constante em todas as concentrações, variando entre 34,17 m e 34,03 m. A estabilidade observada sugere que o impacto da concentração volumétrica é mínimo nessa seção, possivelmente devido à sua proximidade com a barragem, imediatamente a jusante do colapso.

As Seções 2 e 3, apresentam uma leve redução da profundidade com o aumento da CV. Na seção 2, a profundidade passa de 15,47 m (CV = 20%) para 10,82 m (CV = 60%) na Amostra 1, enquanto na seção 3, o valor diminui de 10,33 m para 9,76 m. Isso indica que, nessas seções,

o aumento da concentração tem um efeito moderado, mas progressivo, especialmente na Amostra 1 da seção 2, onde a redução da profundidade é mais evidente.

Assim, como nas seções anteriores, na Seção 4, não houve uma variação significativa das profundidades ao longo das seções. A estabilidade das profundidades nas concentrações de 20% a 50% indica que o aumento do CV não resulta em alterações significativas no escoamento, para as amostras analisadas. Os parâmetros reológicos associados a essas concentrações mantêm o fluxo ativo e dinâmico. Entretanto, no cenário da Amostra 2 para o CV = 60%, a mudança no comportamento do rejeito começa a ser mais evidente. A perda de força do rejeito, associada ao aumento da concentração volumétrica, reflete uma tendência crescente ao repouso, sugerindo que o escoamento se torna menos dinâmico e favorecendo a sedimentação.

Na Seção 5, o comportamento é mais regular, com uma leve tendência de queda nas profundidades conforme a concentração volumétrica aumenta, especialmente na Amostra 1. Entretanto, em CV = 60%, a Amostra 1 apresenta uma profundidade máxima maior em relação às concentrações intermediárias, como observado na seção 6 (5,40 m contra 4,80 m em CV = 40%).

Na Seção 6, o aumento da profundidade da Amostra 1 para o CV = 60%, apresenta um comportamento oposto ao observado nas seções anteriores. Nas Seções 1 a 5, verificou-se uma redução da profundidade em comparação com os outros cenários. No entanto, na Seção 6, esse padrão é alterado, resultando em uma profundidade significativamente maior em relação aos cenários anteriores. Embora a profundidade da Amostra 1 no CV = 60% (5,40 m) seja menor nas demais seções, destaca-se um aumento na profundidade nesta seção, que ocorre juntamente com uma redução da velocidade do fluxo. Esse fenômeno corrobora a tendência de estagnação do fluxo da amostra, sugerindo uma acumulação de rejeito que pode estar influenciando a dinâmica do escoamento.

Na Seção 7, a profundidade apresenta um comportamento não linear, aumentando significativamente na concentração de 50% (5,99 m para a Amostra 1), o que pode sugerir uma mudança abrupta na resistência ao escoamento. Em CV = 60%, a Amostra 2 a profundidade atinge 6,17 m, indicando uma maior capacidade de acúmulo de fluxo.

Por fim, as Seções 8 e 9 apresentam comportamentos distintos relacionados ao fluxo. A Seção 8, localizada no Rio Piracicaba, está situada a montante, o que indica a presença de um remanso dentro do curso d'água. Nessa seção, observa-se a redução da profundidade até o CV = 40%, seguida por um aumento em CV = 50%, para a Amostra 1. Com relação ao CV = 60%

também da Amostra 1, os valores de tensão e viscosidade aumentam de tal forma que o rejeito não alcança a Seção 8.

Em contraste, a Seção 9 representa a última seção a jusante do estudo. Não foram registradas profundidades para $CV = 50\%$ na Amostra 1 e $CV = 60\%$ em ambas as amostras, o que sugere que o escoamento atingiu o estado de repouso antes de alcançar essa seção. Para as amostras com CV de até 40% , não houve uma diferença significativa nas profundidades máximas. No entanto, para os cenários com $CV = 50\%$, é possível identificar a influência dos parâmetros reológicos de cada amostra.

Embora ambas as amostras tenham sido submetidas às mesmas concentrações volumétricas, a Amostra 1 apresenta maior viscosidade, indicando um rejeito com maior resistência ao fluxo e uma tendência acentuada ao repouso. Essa característica evidencia que a composição das amostras de rejeito não é homogênea, o que pode impactar diretamente nos planos de ação emergencial.

De modo geral, as Amostras 1 e 2 exibem comportamentos bastante semelhantes, com variações mínimas nas profundidades registradas ao longo das diferentes seções. Nas concentrações volumétricas mais baixas (20% a 40%), as diferenças são praticamente imperceptíveis. No entanto, a partir de $CV = 50\%$, surgem diferenças relevantes entre as amostras, especialmente nas seções mais distantes.

A seguir são apresentados os gráficos das profundidades máximas registradas nas diferentes seções para as concentrações volumétricas de 20% (Figura 6.29), 30% (Figura 6.30), 40% (Figura 6.31), 50% (Figura 6.32) e 60% (Figura 6.33), para cada amostra. Estes estudos visam destacar o comportamento comparativo entre as duas amostras sob diferentes concentrações volumétricas.

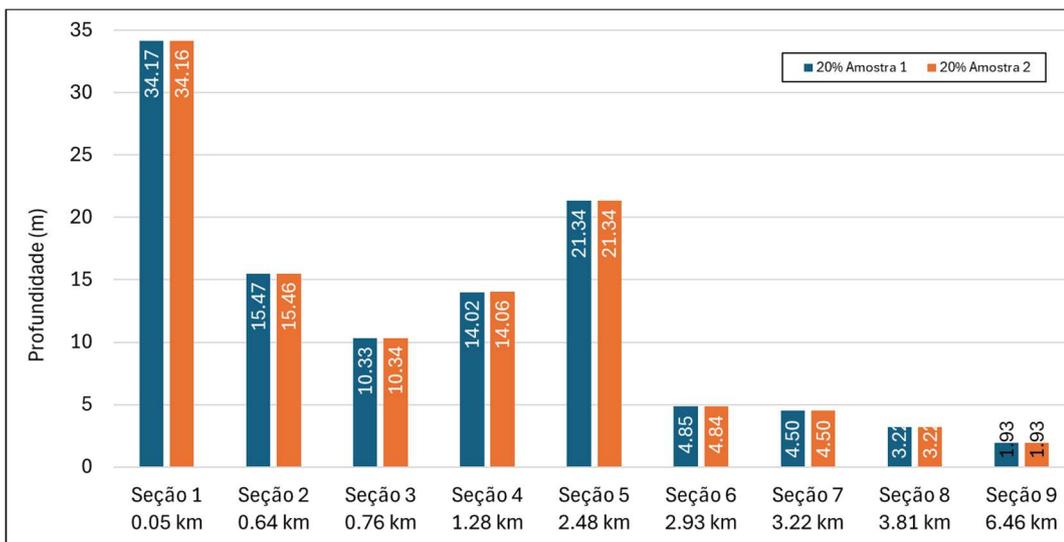


Figura 6.29 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 20%

Fonte: Próprio Autor (2024)

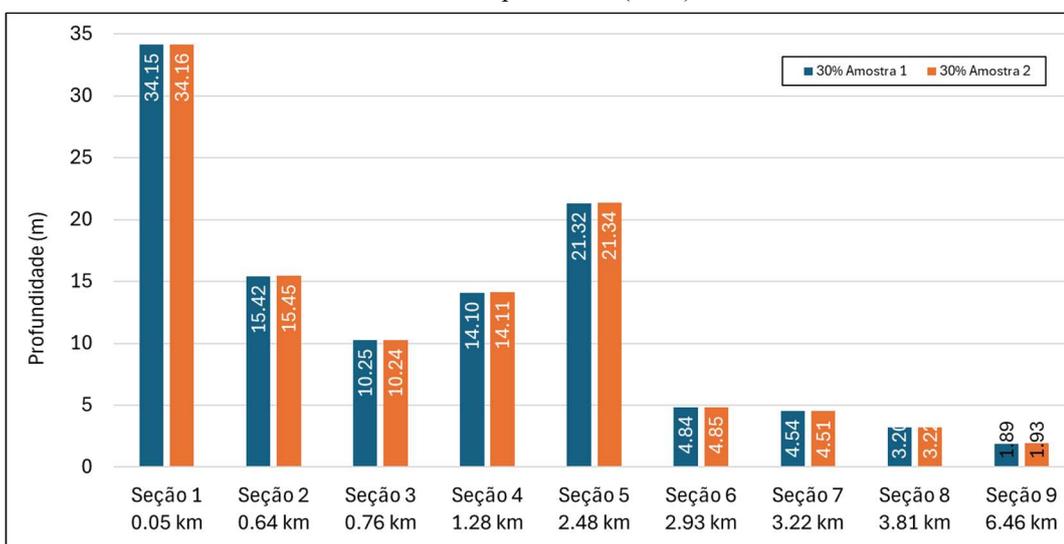


Figura 6.30 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 30%

Fonte: Próprio Autor (2024)

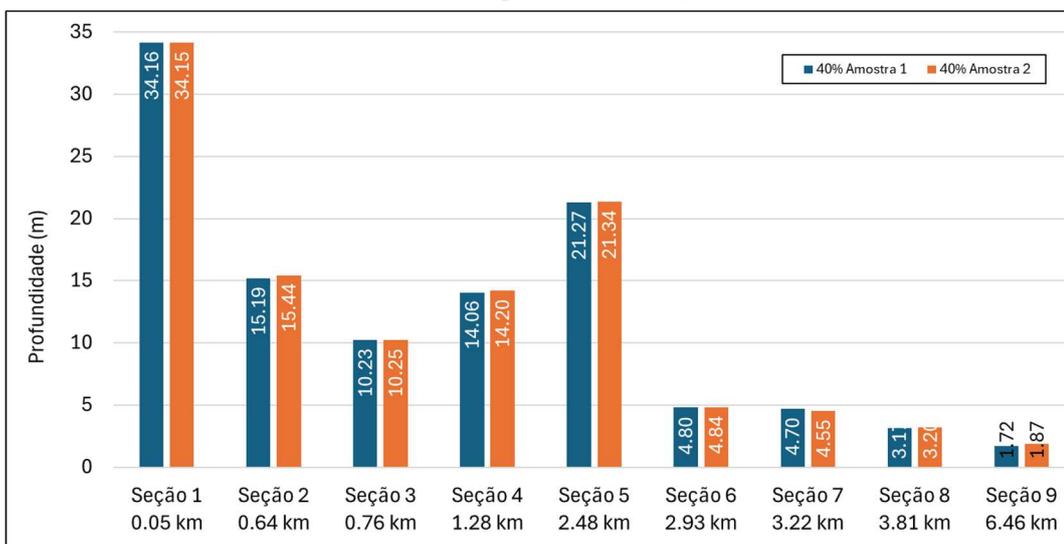


Figura 6.31 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 40%

Fonte: Próprio Autor (2024)

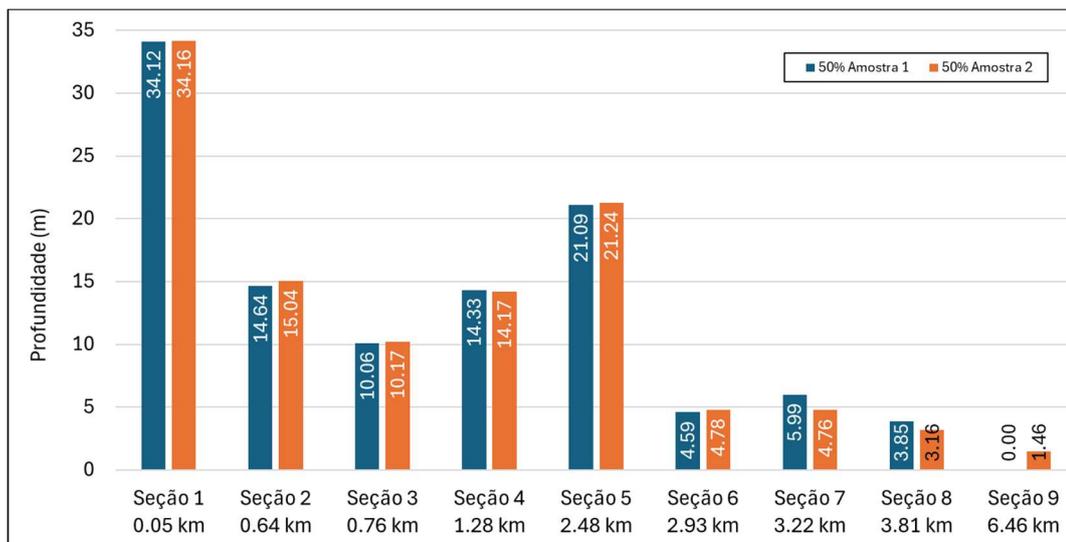


Figura 6.32 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 50%

Fonte: Próprio Autor (2024)

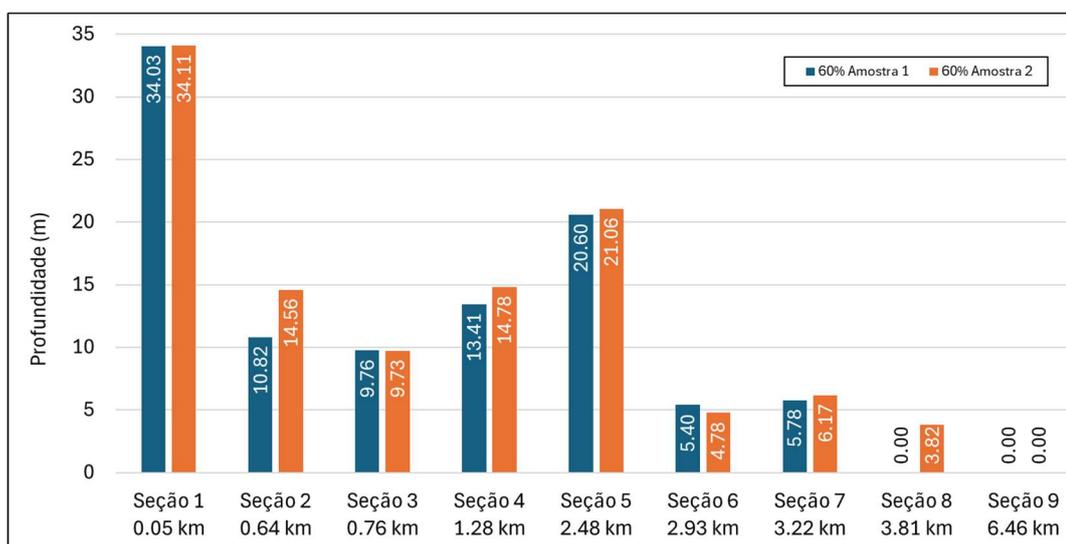


Figura 6.33 – Gráfico de profundidades máximas – CV = 60%

Fonte: Próprio Autor (2024)

Nos cenários de concentrações de 20%, 30% e 40%, ambas as amostras apresentam comportamento praticamente idêntico, com pequenas oscilações nas profundidades ao longo das seções. Isso sugere que a influência dos parâmetros reológicos é reduzida, permitindo escoamentos mais uniformes e fluidos.

A partir da concentração de sólidos de 50%, as diferenças entre as amostras se tornam mais evidentes, especialmente nas seções mais distantes da barragem. Na Seção 2, para a concentração de 60%, há uma diferença de aproximadamente 34,6% entre as amostras, onde a Amostra 1 (10,82 m) já apresenta uma redução significativa de profundidade em comparação com a Amostra 2 (14,56 m).

Essa diferença de comportamento pode ser atribuída à viscosidade e à tensão de escoamento, que são maiores na Amostra 1. Em $CV = 50\%$, a viscosidade da Amostra 1 é 93,7% maior que a da Amostra 2, enquanto em $CV = 60\%$, essa diferença aumenta para 123%. Além disso, a tensão de escoamento da Amostra 1 é consideravelmente maior que a da Amostra 2 em todas as concentrações volumétricas, como pode ser observado na Tabela 5.7, onde os valores de tensão da Amostra 1 são aproximadamente 200% superiores à Amostra 2. A maior viscosidade e a maior tensão de escoamento da Amostra 1 resultam em maior resistência ao escoamento, levando ao acúmulo de material e a maiores profundidades em algumas seções. Essa diferença de comportamento se reflete nas profundidades máximas observadas, com a Amostra 1 tendendo a apresentar maiores profundidades em algumas seções, especialmente nas concentrações volumétricas mais elevadas. Por outro lado, a Amostra 2, com menor viscosidade e menor tensão de escoamento, apresenta um escoamento mais fluido e menores profundidades.

Estes resultados evidenciam que, embora as amostras apresentem comportamentos similares em concentrações mais baixas (até 40%), a Amostra 1 demonstra maior resistência ao fluxo à medida que a concentração de sólidos aumenta. Esse comportamento é crucial para a gestão de segurança de barragens, pois destaca a importância de se considerar a reologia dos rejeitos na modelagem de escoamento, principalmente em condições de concentrações elevadas. A heterogeneidade dos materiais pode impactar diretamente na eficiência de planos de contingência, ressaltando a necessidade de sondagens mais abrangentes, que incluam uma caracterização completa dos rejeitos.

6.6. Análise das Manchas de Inundação para os Cenários Analisados

A delimitação da mancha de inundação é de suma importância, uma vez que ela é um dos principais dados de entrada para o planejamento de ações emergenciais em caso de ruptura de barragem. A mancha de inundação representa a área que será afetada pelo escoamento da polpa de rejeitos, e sua extensão depende de diversos fatores, como o volume de rejeitos, a topografia do terreno, a concentração volumétrica do material e as propriedades reológicas do fluido. Compreender a dinâmica da mancha de inundação é essencial para prever os impactos de um eventual desastre, identificar as áreas de maior risco e implementar medidas de mitigação que minimizem as consequências socioambientais. Neste capítulo, serão analisadas as manchas

de inundação para os diferentes cenários simulados, considerando as variações na concentração volumétrica (CV) e as duas amostras de rejeito.

A Figura 6.34 apresenta a área total da mancha de inundação (em km²) para cada cenário simulado, considerando as concentrações volumétricas de 20% a 60% e as duas amostras de rejeito.

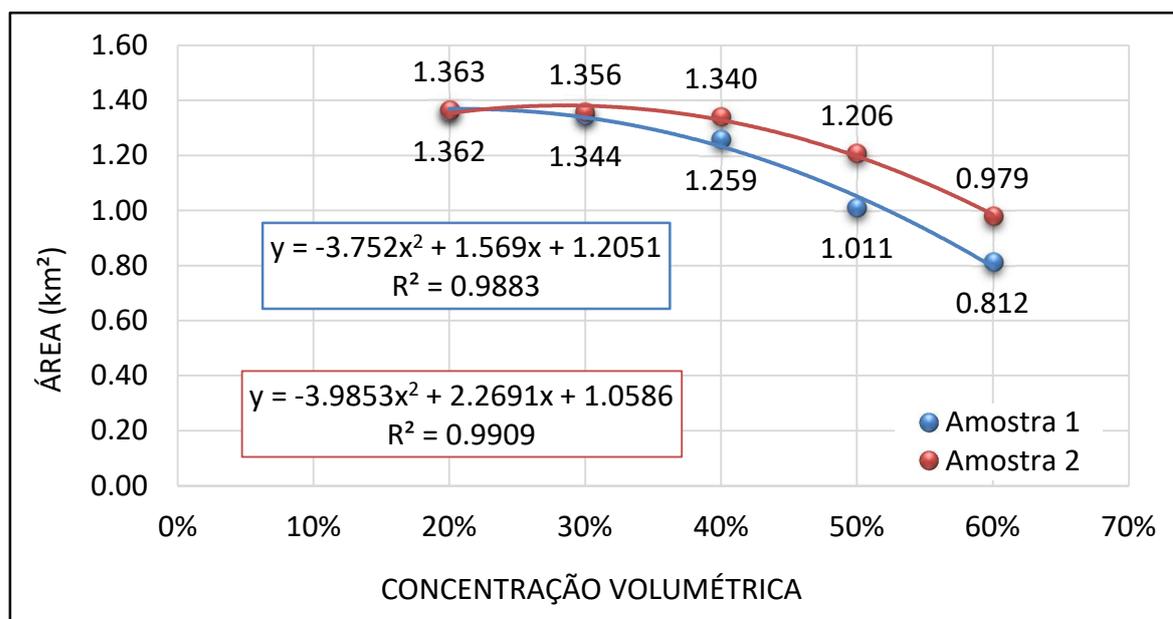


Figura 6.34 – Área da Mancha de Inundação em Função da Concentração Volumétrica e Amostra de Rejeito
Fonte: Próprio Autor (2024)

A Figura 6.34 mostra a tendência de redução da área da mancha de inundação com o aumento da concentração volumétrica. Essa tendência é consistente com o esperado, pois o aumento da concentração de sólidos aumenta a viscosidade e a tensão de escoamento do rejeito, o que aumenta a resistência ao escoamento e, conseqüentemente, diminui a capacidade de propagação do material.

A Tabela 6.6, detalha a diferença entre as áreas das manchas de inundação, considerando cada cenário de concentração volumétrica.

Tabela 6.6 – Diferença entre as áreas das manchas de inundação entra as amostras 1 e 2

CV	Áreas das Manchas (km ²)		Diferença Absoluta		Diferença Percentual (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Km ²	m ²	
20%	1,362	1,363	0,002	1736,3	0,13%
30%	1,344	1,356	0,012	12344,1	0,92%
40%	1,259	1,340	0,081	81292,7	6,46%
50%	1,011	1,206	0,195	195232,7	19,31%
60%	0,812	0,979	0,167	167014,1	20,58%

Fonte: Próprio Autor (2024)

Com base nesses resultados, podemos confirmar a tendência observada no gráfico da Figura 6.34, em que a Amostra 2 apresenta uma área de inundação maior que a Amostra 1 em todas as concentrações volumétricas, indicando uma maior capacidade de propagação do material. As diferenças percentuais são representativas a partir de 40% de CV, o que sugere que a influência das propriedades reológicas, viscosidades e tensões de escoamento, na extensão da mancha de inundação se torna mais evidente em concentrações mais elevadas.

- **40%:** Nesta concentração, a Amostra 1 apresenta uma área de inundação de 1,259 km², enquanto a Amostra 2 apresenta 1,340 km². Essa diferença de 6,46% indica que a Amostra 2, com menor viscosidade e tensão de escoamento, se propaga por uma área ligeiramente maior, apesar da concentração de sólidos ser a mesma. Essa diferença pode ser atribuída à maior fluidez da Amostra 2, que permite que o material se espalhe com maior facilidade.
- **50%:** Para essa concentração volumétrica, a diferença entre as amostras aumenta. A Amostra 1 apresenta uma área de inundação de 1,011 km², enquanto a Amostra 2 apresenta 1,206 km². Essa diferença de 19,31% reforça a tendência observada a partir do CV= 40%, com a Amostra 2 inundando uma área maior devido à sua menor resistência ao escoamento. A maior diferença observada nesta concentração pode estar relacionada ao fato de que a Amostra 1, com maior viscosidade, começa a apresentar um comportamento mais viscoso, o que limita sua capacidade de propagação.
- **60%:** Na concentração mais alta, a diferença entre as amostras se mantém em 20,6% (167.014,1 m²). A Amostra 1 apresenta uma área de inundação de 0,812 km², enquanto a Amostra 2 apresenta 0,979 km². Embora a diferença percentual seja similar à observada em 50% de CV, é importante notar que a diferença absoluta diminui em relação à concentração anterior. Essa variação sugere que outros fatores, além da reologia, podem estar influenciando a extensão da mancha de inundação em concentrações muito elevadas. Por exemplo, a topografia pode ter uma influência mais significativa nesses cenários, onde o fluxo da polpa precisa de mais energia para a sua propagação.

Essa tendência de redução da mancha de inundação para a Amostra 1 pode ser explicada pelo aumento da viscosidade e da tensão de escoamento do rejeito em concentrações mais elevadas. A viscosidade, que representa a resistência do fluido ao escoamento, e a tensão de escoamento, que é a tensão mínima necessária para iniciar o movimento do fluido, atuam como

forças resistentes que reduzem a energia do fluxo e limitam a capacidade de propagação do rejeito. Conseqüentemente, observa-se uma redução na área da mancha de inundação com o aumento da concentração volumétrica, como demonstrado na Figura 6.34.

As diferenças observadas entre as amostras, especialmente em concentrações elevadas, têm implicações importantes para a gestão de riscos e o planejamento de ações emergenciais. A heterogeneidade do material e a variação nas propriedades reológicas podem influenciar significativamente na extensão da área afetada por uma ruptura de barragem. É fundamental que os estudos de risco considerem essa variabilidade e utilizem dados representativos das características do rejeito para garantir a precisão das previsões e a eficácia dos planos de ações emergências. Além, de considerar uma margem de erro das áreas, principalmente, próximas a propriedades inseridas dentro da área da ZAS (Zona de Alto Salvamento).

Por fim, pode-se concluir que, a análise das manchas de inundação demonstra a influência da concentração volumétrica e das propriedades reológicas do rejeito na extensão da área afetada por uma ruptura de barragem. O aumento da concentração de sólidos leva a uma redução da área da mancha de inundação, especialmente para a Amostra 1, que apresenta maior viscosidade e tensão de escoamento. Esses resultados reforçam a importância de se considerar as propriedades reológicas do rejeito nos estudos de ruptura hipotética de barragem. A utilização de dados que representem a variabilidade do material armazenado é crucial para garantir a precisão das previsões e a eficácia do planejamento de ações emergenciais, que visa garantir a segurança da população e a minimização dos impactos socioambientais.

6.6.1. Mapas de Inundação

Para ilustrar a extensão da mancha de inundação em cada cenário, da Figura 6.35 até a Figura 6.39 apresentam os mapas das áreas inundadas para as diferentes concentrações volumétricas e amostras de rejeito. A mancha roxa representa a Amostra 1 e a mancha laranja, a Amostra 2.

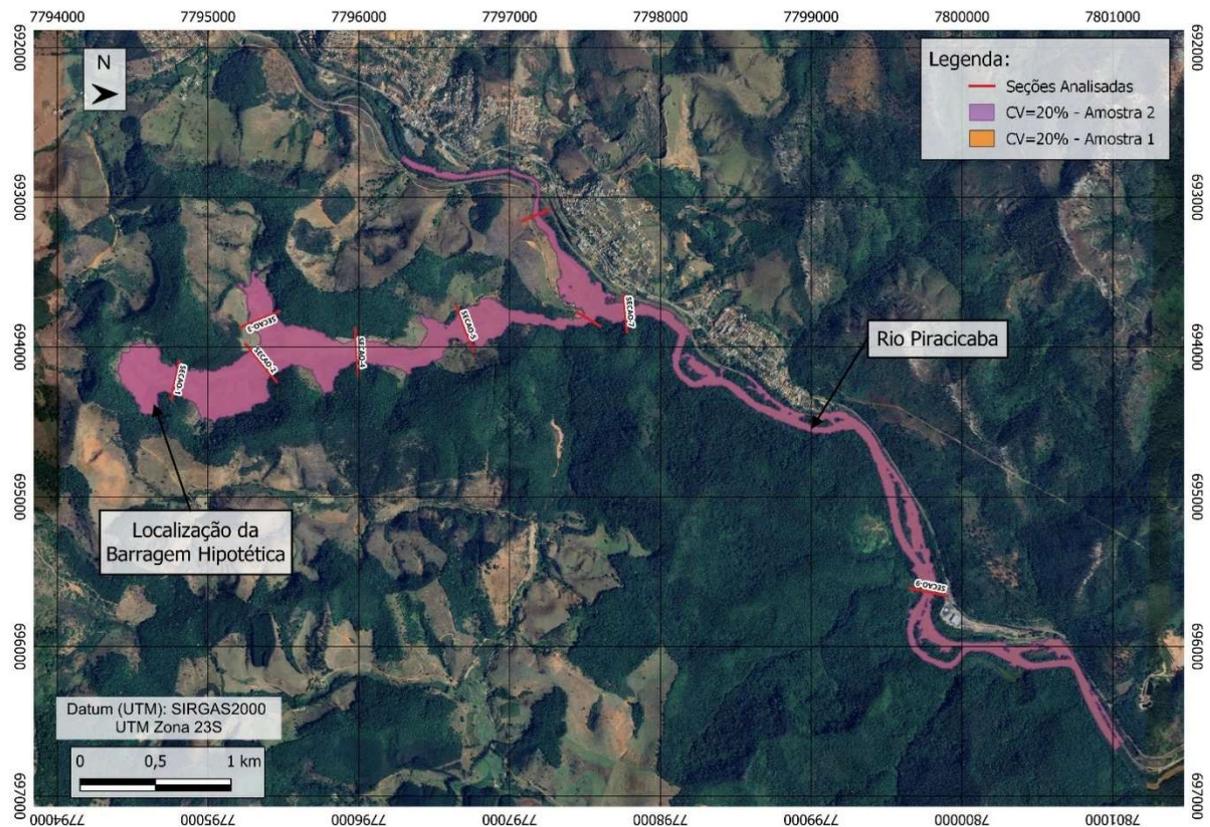


Figura 6.35 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 20% (Amostra 1 e Amostra 2)
 Fonte: Próprio Autor (2024)

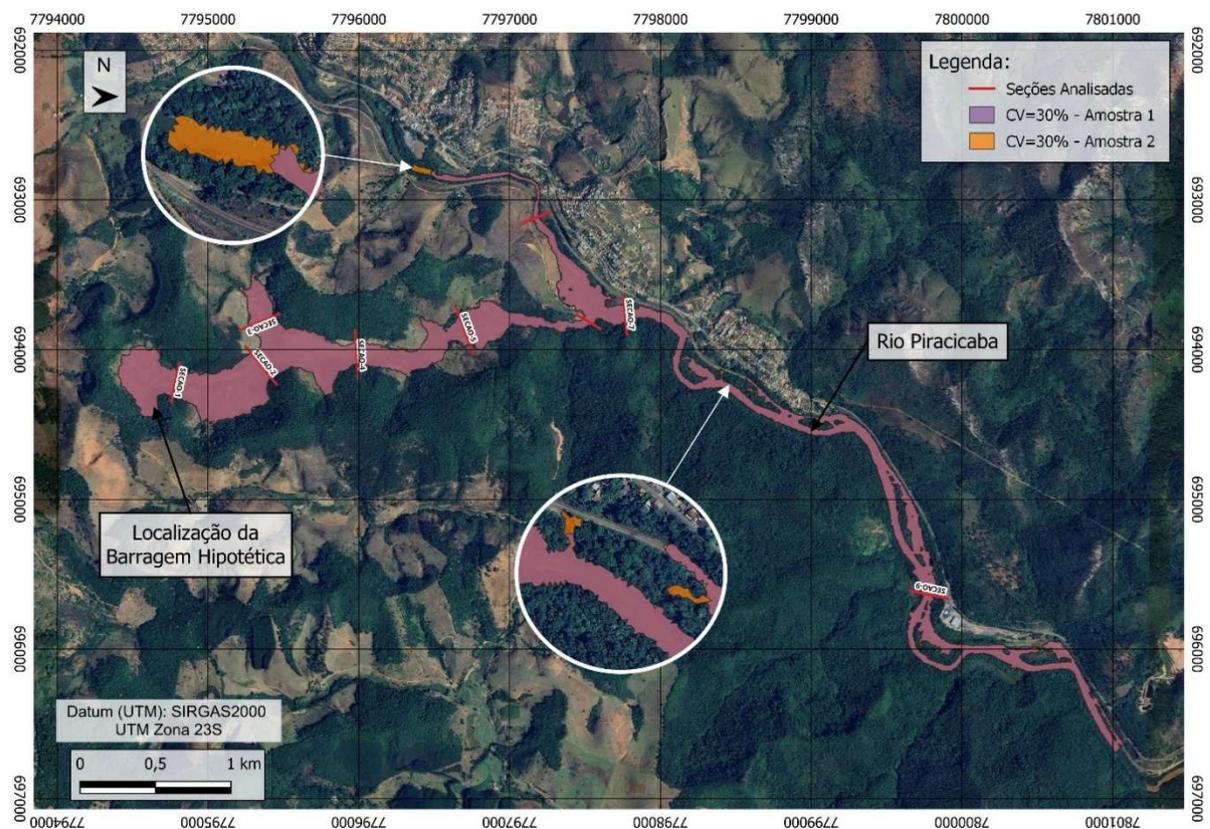


Figura 6.36 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 30% (Amostra 1 e Amostra 2)
 Fonte: Próprio Autor (2024)

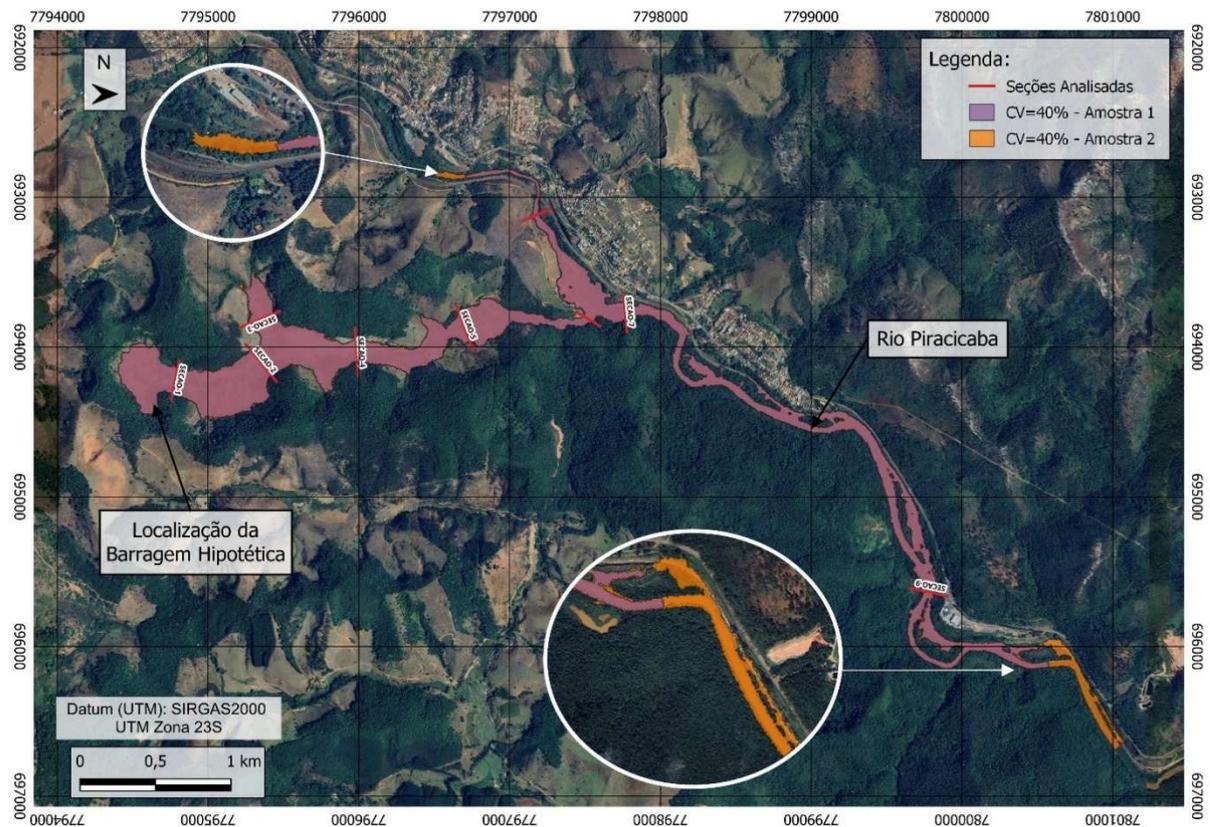


Figura 6.37 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 40% (Amostra 1 e Amostra 2)
Fonte: Próprio Autor (2024)

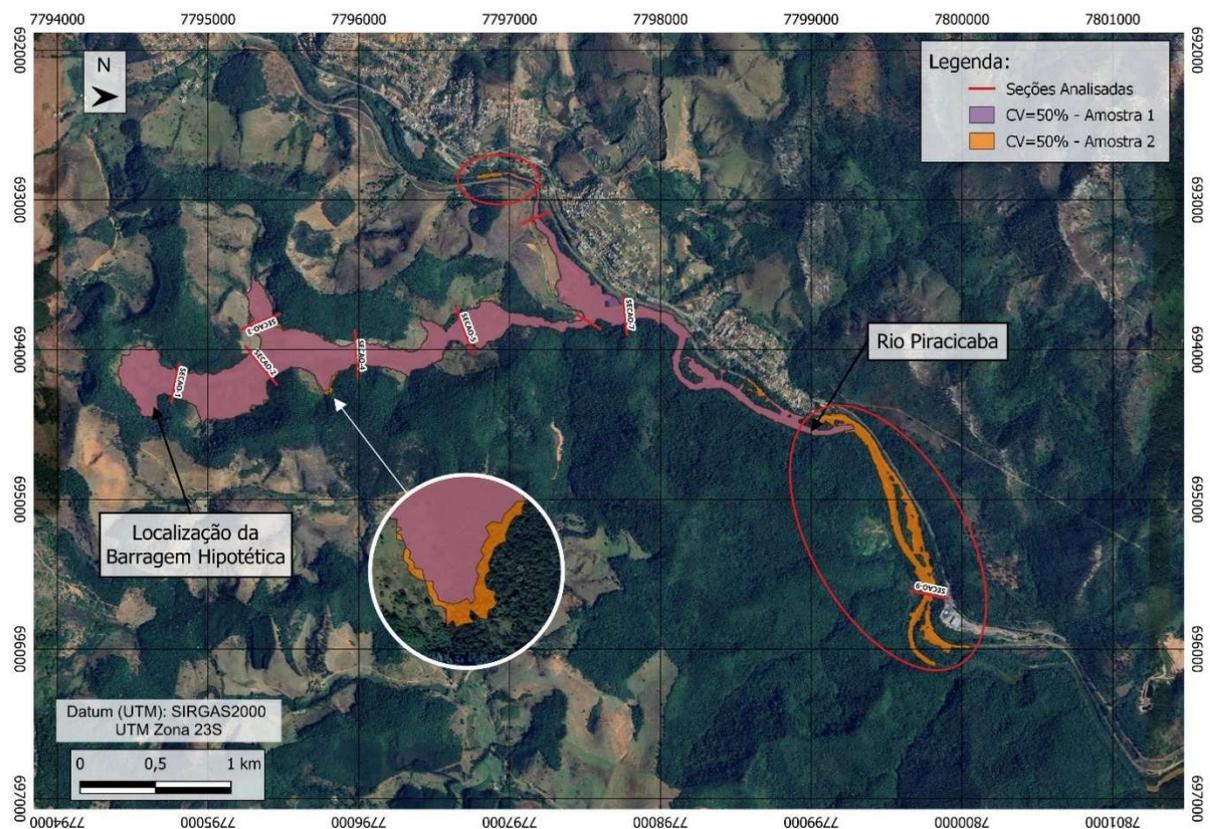


Figura 6.38 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 50% (Amostra 1 e Amostra 2)
Fonte: Próprio Autor (2024)

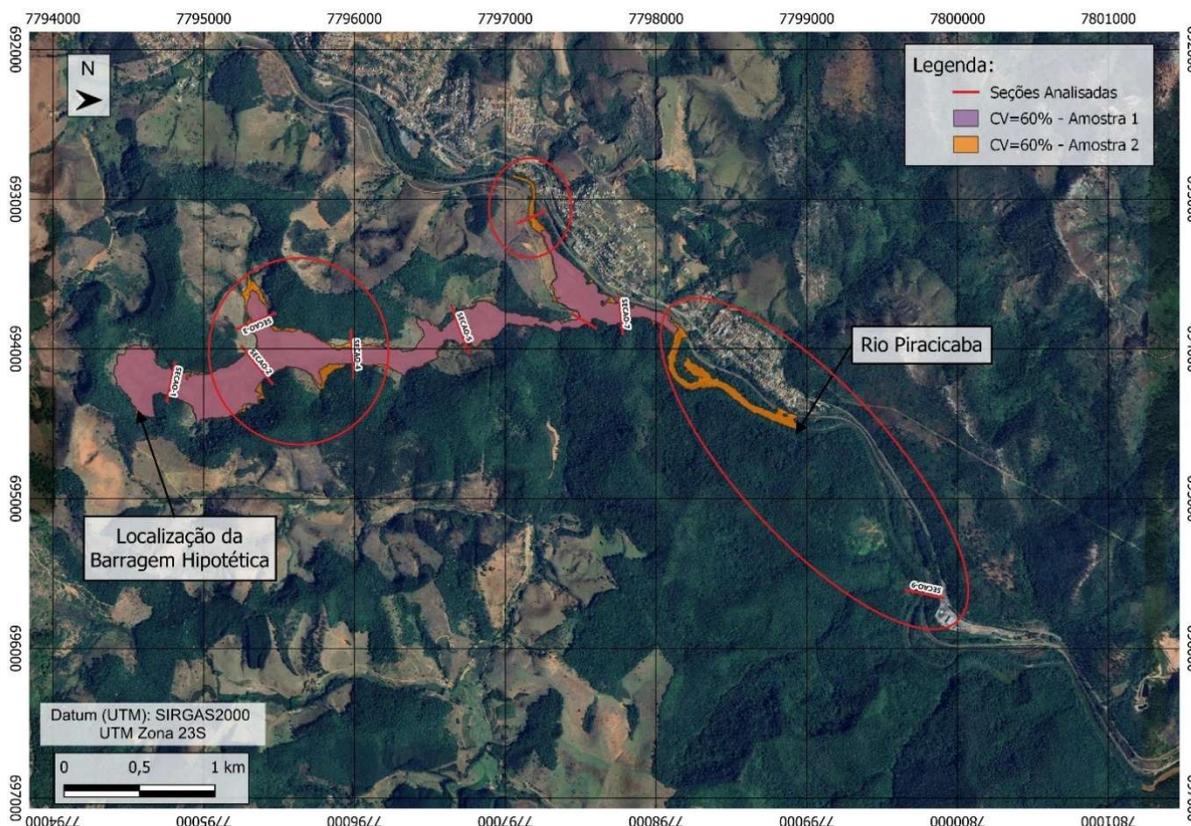


Figura 6.39 – Mapa geral com as manchas de inundação para CV = 60% (Amostra 1 e Amostra 2)
 Fonte: Próprio Autor (2024)

A análise visual destes mapas é de suma importância na compreensão da distribuição espacial da inundação e dos potenciais impactos em diferentes cenários. Avaliando os mapas, podemos concluir que:

- **CV = 20%:** As manchas de inundação para ambas as amostras são praticamente idênticas, indicando que, nesta concentração, as diferenças reológicas têm pouca influência na extensão da inundação.
- **CV = 30%:** As diferenças entre as manchas começam a se tornar perceptíveis. A mancha da Amostra 1 avança um pouco mais no trecho de remanso do Rio Piracicaba, após a Seção 8, e no final do trecho analisado, se comparada com os resultados da Amostra 2. Essa diferença de 0,92% na área inundada, apesar de pequena, indica o início da influência das características reológicas no comportamento do fluxo entre as duas amostras.
- **CV = 40%:** A partir dessa concentração a influência dos parâmetros reológicos é mais evidente. A mancha da Amostra 2 avança de forma significativa em relação à Amostra

1, tanto no trecho de remanso como no trecho final, onde a mancha da Amostra 1 cessa antes do final do trecho analisado.

- **CV = 50%:** Nos cenários a partir dessa concentração volumétrica as diferenças entre as manchas são perceptíveis desde o início do modelo, evidenciado entre as seções 2 e 4. Ambas as manchas param antes do final do trecho da modelagem, evidenciando a influência da CV no alcance da inundação. A Amostra 1 cessa bem antes da Amostra 2, seguindo o padrão observado na CV de 40%.
- **CV = 60%:** As maiores diferenças entre as manchas de inundação das amostras são observadas neste cenário. Em vários trechos, a Amostra 2 avança mais que a Amostra 1. Ademais, A alta concentração influencia significativamente o alcance das manchas, que se encerram muito antes em comparação com as outras concentrações.

Conforme apresentado, é possível observar que o rejeito apresenta características reológicas distintas. As diferenças observadas entre as amostras podem estar relacionadas ao tempo de vida útil da barragem e à evolução dos métodos de extração, que podem afetar as características do rejeito e, conseqüentemente, o comportamento reológico do material.

A homogeneização do material armazenado em barragens de mineração é crucial para a avaliação precisa dos riscos de inundação. As diferenças observadas entre as manchas de inundação, mesmo em amostras retiradas do mesmo reservatório, evidenciam a importância de se considerar as características reológicas na elaboração de Planos de Emergência de Barragens de Mineração (PEBM). A falta de caracterização adequada pode levar a uma subestimação ou superestimação dos riscos, comprometendo a eficácia do PEBM e a segurança da população.

As análises realizadas neste capítulo demonstram a complexidade do fenômeno de inundação por rejeitos de mineração e a necessidade de se considerar as características reológicas dos materiais e as condições específicas de cada cenário. Adicionalmente, destaca-se a necessidade de incluir mais amostras durante os estudos quando são observadas informações tão distintas, a fim de obter uma caracterização mais precisa do material depositado na barragem. Assim como é importante incluir informações detalhadas sobre a profundidade de extração das amostras e a planta de locação das estruturas, a fim de aprofundar a compreensão da dinâmica do rejeito, que irá influenciar na extensão da mancha de inundação. Essa análise detalhada permite selecionar os parâmetros reológicos mais representativos durante os estudos de ruptura hipotética de barragens.

7. CONCLUSÃO

Este estudo analisou vários cenários de ruptura de uma barragem hipotética de rejeitos de minério de ferro, utilizando o modelo computacional RiverFlow 2D, com a finalidade de simular o escoamento dos rejeitos em diferentes concentrações volumétricas e diferentes propriedades reológicas. A metodologia empregada considerou a variação da concentração de sólidos na mistura, de 20% a 60%, e a utilização de duas amostras distintas de rejeito coletadas do mesmo reservatório, onde, cada amostra possui características reológicas específicas, determinadas por ensaios de laboratório.

Os resultados da simulação foram avaliados em termos de área de inundação, velocidade máxima de escoamento, profundidade máxima do fluxo, tempo de chegada da frente da onda e o tempo de chegada da onda de pico. A análise mostrou que a concentração de sólidos e, conseqüentemente, as propriedades reológicas do rejeito têm um impacto significativo na dinâmica do escoamento. Observou-se que o aumento da concentração de sólidos geralmente leva a uma redução na área de inundação, velocidades mais baixas, maiores profundidades e tempos de chegada mais longos.

As duas amostras de rejeito apresentaram comportamentos distintos, especialmente nas concentrações volumétricas superiores a 40%. A Amostra 1, com maior viscosidade e tensão de escoamento, apresentou geralmente menor área de inundação, velocidades mais baixas e maiores profundidades em comparação com a Amostra 2. Essa diferença de comportamento de escoamento destaca a importância de uma caracterização mais detalhada do rejeito para uma avaliação precisa dos resultados, incluindo a especificação detalhada dos pontos de coleta e das profundidades de extração das amostras. Além disso, vale ressaltar a importância de modelar adequadamente os materiais armazenados no reservatório. A modelagem precisa das propriedades dos materiais, como a reologia e das propriedades geotécnicas, é fundamental para garantir a confiabilidade das simulações e a precisão na previsão do comportamento do rejeito em caso de colapso de uma barragem.

A metodologia utilizada neste estudo se baseou em dados reais de ensaios de laboratório para caracterizar as propriedades reológicas do rejeito de minério de ferro. Em cenários reais, a obtenção de amostras representativas e a realização de ensaios adequados são cruciais para garantir a confiabilidade dos resultados da simulação e a precisão da avaliação de riscos.

É importante também destacar que a vida útil da barragem e o processo de extração e disposição do rejeito podem impactar nas características do material e, conseqüentemente, nas características reológicas do rejeito. A heterogeneidade do material pode influenciar significativamente na extensão da área afetada por uma ruptura da barragem, evidenciando a necessidade de uma caracterização completa do rejeito e não apenas amostras superficiais do rejeito.

Os resultados do estudo demonstram como a precisão na delimitação da mancha de inundação é crucial para a gestão de riscos, pois pode superestimar ou subestimar os riscos. Manchas de inundação pequenas podem colocar em risco vidas humanas e comprometer a eficácia do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, enquanto manchas muito extensas podem prejudicar a população, uma vez que as propriedades, sejam elas residenciais ou comerciais, dentro da área de inundação perdem valor. Além disso, a ansiedade de residir em uma área de risco também deve ser considerada.

Diante dos resultados apresentados, este estudo recomenda a adoção das seguintes medidas:

- **Aumentar a caracterização do rejeito:** Coletar várias amostras em diferentes pontos e profundidades do reservatório, documentando a localização e profundidade de cada amostra. A quantidade de amostras deve ser definida considerando o tempo de vida útil da barragem, pois a deposição gradual de rejeitos ao longo do tempo pode levar à formação de camadas com características diferentes. Dessa forma, é importante que a amostra apresente as profundidades de retirada das amostras e permitir a identificação das diferentes fases de deposição e as diferentes características do rejeito depositado, garantindo uma representação mais fidedigna. Ademais, a análise do plano de disposição do rejeito na barragem ajuda a direcionar a coleta de amostras, permitindo identificar a origem do rejeito disposto em cada zona de espigotamento do reservatório.
- **Incentivo a pesquisa:** Recomenda-se que os órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Mineração (ANM), em conjunto com instituições de ensino e pesquisa, realizem estudos para determinar a quantidade ideal de amostras para caracterização reológica de rejeitos, considerando o volume e/ou tamanho da barragem. Esses estudos devem incluir a coleta de amostras em diferentes pontos da barragem, a realização de ensaios laboratoriais para avaliar as propriedades dos materiais e o uso de métodos estatísticos para verificar a representatividade das amostras. Os resultados devem servir

como base para a criação de diretrizes claras, a serem incorporadas nas legislações e regulamentações, sobre a quantidade de amostras a ser adotada conforme o porte da barragem. Essa iniciativa irá contribuir para a obtenção de dados mais precisos durante os estudos de ruptura hipotética da barragem, a realização de análises de risco mais detalhadas e a elaboração de um PEBM mais assertivo.

Diante do exposto, a presente dissertação contribui para o avanço do conhecimento sobre o comportamento de estudo de ruptura hipotética de barragens de rejeitos e fornece informações importantes para a tomada de decisão na gestão de riscos, visando maior segurança da população e a proteção do meio ambiente.

O estudo considerou a análise de sensibilidade de apenas duas amostras reais de rejeito de minério de ferro. Para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de modelagens para análises de sensibilidade considerando um conjunto maior de amostras, abrangendo diferentes pontos e profundidades do mesmo reservatório de rejeito, independentemente do tipo de rejeito. A coleta de amostras em diferentes profundidades possibilita uma avaliação mais abrangente das variações reológicas do rejeito, permitindo a análise da influência desses parâmetros nas modelagens hidráulicas. Essa abordagem irá contribuir para avaliar se ocorre uma linearidade nas variações entre as concentrações e a deposição do rejeito do longo do vale, bem como seu impacto nos resultados hidráulicos, na delimitação da mancha de inundação e na eficácia das medidas de mitigação de riscos.

REFERÊNCIAS

ABRHIDRO (org.). **XXV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2023. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14720>. Acesso em: 24 mar. 2024.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução espacial (células de 1m), Imagens de satélite de Alta Resolução (0,5m), Pontos de Controle e Curvas de Nível com equidistância de 1m para os 26 municípios elencados pelo Comitê de Bacia do Rio Doce**. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/830d00e6-9924-469d-b24b-aff67a1fd432>. Acesso em: 03 abr. 2024.

AVABRUM. **A Tragédia-Crim**: dói demais o jeito que vocês se foram. Dói demais o jeito que vocês se foram. Disponível em: <https://avabrum.org.br/a-tragedia-crime/>. Acesso em: 26 set. 2024.

ÁVILA, Joaquim Pimenta de; SAWAYA, Marta; SAYÃO, Alberto; FERREIRA, Leonardo. Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes. *Geotecnia*, [S.L.], n. 152, p. 435-464, 12 ago. 2021.

AZAM, Shahid; LI, Qiren. Tailings Dam Failures: a review of the last one hundred years. *Waste Geo Technics*, [s. l.], p. 50-53, dez. 2010.

BAI, Yu-Chuan; XU, Dong; LU, Dong-Qiang. Numerical Simulation of Two-Dimensional Dam-Break Flows in Curved Channels. *Journal Of Hydrodynamics*, [S.L.], v. 19, n. 6, p. 726-735, dez. 2007. Springer Science and Business Media LLC. [http://dx.doi.org/10.1016/s1001-6058\(08\)60010-4](http://dx.doi.org/10.1016/s1001-6058(08)60010-4)

BAKER, E. **Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident**. [s.l: s.n.], 2017.

BAPTISTA, Márcio; LARA, Márcia. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2014. 473 p.

BASELT, Ivo *et al.* Evolution of stony debris flows in laboratory experiments. *Geomorphology*, [S.L.], v. 372, p. 107431, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107431>.

BRASIL. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. **Lei Nº 12.334 de 20 de Setembro de 2010**.

BRASIL. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. **Portaria Nº 70.389, de 17 de Maio de 2017**.

BRASIL. Altera a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 e dá outras providências. **Resolução Nº 32, de 11 de maio de 2020**.

BRASIL. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. **Resolução Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**.

CÁLCULO de Volumes. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/228373/mod_resource/content/1/STT0410%20-%20Calculo%20de%20Volumes%202014.pdf. Acesso em: 03 mar. 2024

CHOW, Ven Te. **Open Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959. 680 p.

CNRH. **Resolução CNRH Nº 241, de 10 de Setembro de 2024**: Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por dano potencial associado, por volume e por categoria de risco, em atendimento ao art. 7º da Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. 204. ed. Seção 1, p. 137.

COSTA, Camila Moreira. **Caracterização Reológica de Fluidos Complexos**. 2017. Disponível em: https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2017/relatorios_pdf/ctc/MEC/MEC-Camila%20Moreira%20Costa.pdf. Acesso em: 01 abr. 2024.

COSTA, Filipe et al. Numerical sensitivity analysis for stress-strain simulation and flow liquefaction assessment of tailings storage facilities using the NorSand constitutive model. **Soils And Rocks**, [S.L.], v. 47, n. 1, p. 1-9, 30 dez. 2023. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2024.011322>.

DAVIES, Michael. Filtered Dry Stacked Tailings: the fundamentals. **Proceedings Tailings And Mine Waste**, Vancouver, v. -, n. -, p. 1-9, nov. 2011.

FELICIANO, Fernando César Soares. **Modelagem Hidrodinâmica e Mapeamento de Áreas de Inundação Urbana do Município de Rio Piracicaba/MG**. 2022. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

FONSECA, António Viana da et al. The mechanics of iron tailings from laboratory tests on reconstituted samples collected in post-mortem Dam I in Brumadinho. **Soils And Rocks**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 1-20, 19 abr. 2022. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2022.001122>.

FRANKS, Daniel M. *et al.* Tailings facility disclosures reveal stability risks. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 11, n. 1, 5 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-84897-0>.

FREIRE NETO, João Pimenta. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GALINDO, Manuella Suellen Vieira. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Determinação da Viscosidade de Solos**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2013.

HALABI, A. L. M. *et al.* Tailings Dam Failures: a historical analysis of the risk. **Journal Of Failure Analysis And Prevention**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 464-477, 15 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11668-022-01355-3>.

HYDRONIA. **RiverFlow2D para QGIS: modelo bidimensional de inundaciones y dinámica de ríos**. Pembroke Pines: Hydronia Llc, 2020. 244 p.

HYDRONIA (Usa) (ed.). **RiverFlow2D Two-Dimensional Flood and River Dynamics Model: reference manual**. Pembroke Pines: Hydronia, 2022. 357 p.

ICOLD. **World Register of Dams: general synthesis**. General Synthesis. 2020. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp. Acesso em: 16 maio 2023.

IVERSON, Richard M. The physics of debris flows. **Reviews Of Geophysics**, [S.L.], v. 35, n. 3, p. 245-296, ago. 1997. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/97rg00426>.

IVERSON, Richard M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments. **Geomorphology**, [S.L.], v. 244, p. 9-20, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.033>.

KIVENTERÄ, Jenni *et al.* Mine tailings as a raw material in alkali activation: a review. **International Journal Of Minerals, Metallurgy And Materials**, [S.L.], v. 27, n. 8, p. 1009-1020, ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12613-020-2129-6>.

KOSSOFF, D. *et al.* Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, [S.L.], v. 51, p. 229-245, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>.

LANZONI, Stefano; GREGORETTI, Carlo; STANCANELLI, Laura Maria. Coarse-grained debris flow dynamics on erodible beds. **Journal Of Geophysical Research: Earth Surface**, [S.L.], v. 122, n. 3, p. 592-614, mar. 2017. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2016jf004046>.

LIU, Xiaoli; LIU, Yushuang; ZHAO, Hongyi. Shear-sliding failure in a cohesionless seabed induced by waves and its correlation with liquefaction. **Ocean Engineering**, [S.L.], v. 320, p. 120339, mar. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120339>.

MAFIOLETTI, Kellen; CARNIATO, Patrícia. **Fenômenos da Engenharia: fluidos**. Fluidos. 2013. Disponível em: https://fenomenosdaengenharia.blogspot.com/2013/05/fluidos_28.html. Acesso em: 08 abr. 2024.

- MARTÍNEZ-ARANDA, S. et al. Novel discretization strategies for the 2D non-Newtonian resistance term in geophysical shallow flows. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 302, p. 106625, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106625>.
- MATOS, Artur *et al.* Metodologia para a Caracterização do Coeficiente de Manning Variando na Seção Transversal e ao Longo do Canal Estudo de Caso Bacia do Alto Sapucaí-MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 21-28, 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p21-28>.
- MELLO, Júlia Mendonça Cardoso de; ELEUTÉRIO, Julian Cardoso. Análise de sensibilidade do modelo de ruptura hipotética de uma barragem de armazenamento de água à equação de brecha, malha numérica e ao coeficiente de manning. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, p. 1-10, nov. 2021.
- MELO, Leonardo Pires Reis de. **Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da barragem tico-tico**. 2013. 199 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- MELO, Luísa. **Entenda o que é a liquefação, fenômeno que pode levar barragens ao colapso**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/02/07/entenda-o-que-e-a-liquefacao-fenomeno-que-pode-levar-barragens-ao-colapso.ghtml>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- MINERAÇÃO, ANM - Agência Nacional de **Pesquisar Barragens**. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/GerenciarPublico>. Acesso em: 16 maio 2023.
- MORALES-ESTEBAN, Antonio et al. Dynamic Analysis of the Almagrera Tailings Dam with Dry Closure Condition. **Sustainability**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 1607, 15 fev. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su16041607>.
- OLDECOP, Luciano; RODARI, Germán. Unsaturated mine tailings disposal. **Soils And Rocks**, [S.L.], v. 44, n. 3, p. 1-12, 13 ago. 2021. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2021.067421>.
- OWEN, J.R. *et al.* Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. **International Journal Of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 42, p. 101361, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101361>.
- PICIULLO, Luca *et al.* A new look at the statistics of tailings dam failures. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 303, p. 106657, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657>.
- PEREIRA, Luís Flávio; CRUZ, Gabriela de Barros; GUIMARÃES, Ricardo Morato Fiúza. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal Of Environmental Analysis And Progress**, [S.L.], p. 122-129, 19 fev. 2019. **Journal of Environmental Analysis and Progress - JEAP**. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.4.2.2019.2373.122-129>.
- PUDASAINI, Shiva P.; FISCHER, Jan-Thomas. A mechanical model for phase separation in debris flow. **International Journal Of Multiphase Flow**, [S.L.], v. 129, p. 103292, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103292>.
- RAMOS, Catarina et al. CPTu-based approaches for cyclic liquefaction assessment of alluvial soil profiles. **Soils And Rocks**, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 1-14, 22 nov. 2021. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2021.070121>.
- REIS, Matheus de Oliveira; MOURA, Ana Carolina Mayrinck Braga de; COTA, Guilherme Eduardo Macedo; MAGALHÃES JUNIOR, Antônio Pereira. Panorama dos rompimentos de barragens de rejeito de minério no mundo. **Caderno de Geografia**, [S.L.], v. 30, n. 61, p. 368, 5 abr. 2020. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2020v30n61p368>.
- RICO, M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, A. Floods from tailings dam failures. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 154, n. 1-3, p. 79-87, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.110>.
- ROCHA, Cláudia Sueli da; SILVA, Luiz Sérgio; SILVA, Jandira Maciel da. Experiences of workers at the legal medical institute of Belo Horizonte, Minas Gerais, facing the mass disaster: dam failure. **New Trends In Qualitative Research**, [S.L.], v. 13, p. 1-10, 8 jul. 2022. Ludomedia. <http://dx.doi.org/10.36367/ntqr.13.2022.e730>.

- SAKANO, Victor Keniti. **Métodos Avançados para Avaliação da Natureza Reológica de Suspensões Concentradas Aplicados ao Escoamento Pós Colapso de Barragens de Rejeito**. 2022. 247 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.
- SEEGER, Manuel; QUINTON, John; KUHN, Nikolaus J.. Experiments in Earth surface process research. **Catena**, [S.L.], v. 91, p. 1-3, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2011.10.003>.
- SCHRAMM, Gebhard. **Reologia e Reometria: fundamentos teóricos e práticos**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 232 p.
- SILVA, Késsia Brunelli Carvalho da; RIBEIRO, Kátia Daniela Ribeiro. RUPTURA EM BARRAGENS DE REJEITOS: uma abordagem sobre monitoramento e fiscalização. **Ignis: Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, [s. l.], v. 9, p. 17-37, dez. 2020.
- SMITH, G P *et al.* **Flood Hazard**. 07. ed. Manly Vale: Water Research Laboratory, 2014. 59 p.
- TEIXEIRA, Emmanuel Kennedy da Costa *et al.* Manning's roughness coefficient for the Doce River. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, n. 52, p. 1-12, 22 out. 2018. <Http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.231820180013>.
- THEISEN, Klaus Machado. **Aplicação do princípio da correspondência elasto-viscoelástica para previsão de deformabilidade de misturas asfálticas**. 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- THOMÉ, Romeu; PASSINI, Matheus Leonardo. BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em minas gerais. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**, [S. l.], v. 18, n. 34, p. 49-65, 2018. Disponível em: <https://saber.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/19480>. Acesso em: 16 maio. 2023.
- USA. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Energy Loss Coefficients**. In: ENGINEERS, Us Army Corps Of *et al.* **HEC-RAS: river analysis system**. Washington: Hydrologic Engineering Center, 2024. p. 1-11.
- VAN VLIET, Ton; LYKLEMA, Hans. 6 Rheology. **Fundamentals Of Interface And Colloid Science**, [S.L.], p. 6.1-6.88, 2005. Elsevier. [http://dx.doi.org/10.1016/s1874-5679\(05\)80024-8](http://dx.doi.org/10.1016/s1874-5679(05)80024-8).