



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA BEATRIZ ACCIOLY DE MENEZES

**ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK) PARA BARRAGEM DE
REJEITO**

Recife

2023

ANA BEATRIZ ACCIOLY DE MENEZES

**ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK) PARA BARRAGEM DE
REJEITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M543e	Menezes, Ana Beatriz Accioly de. Estudo de ruptura hipotética (Dam Break) para barragem de rejeito / Ana Beatriz Accioly de Menezes. – 2023. 116 f.: il., fig., tab. e siglas. Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023. Inclui referências. 1. Engenharia Civil. 2. Mineração. 3. Modelagem. 4. Simulação numérica. 5. Reservatório. 6. Mancha de inundação. I. Azevedo, Roberto Gonçalves de (Orientador). II. Título. 624 CDD (22. ed.)	UFPE BCTG/2024-33
-------	--	---------------------------------

ANA BEATRIZ ACCIOLY DE MENEZES

**ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK) PARA BARRAGEM DE
REJEITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 21/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Profa. Dra. Silvanete Severino da Silva (Examinadora Externa)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

participação por videoconferência

Profa. Dra. Larissa Ferreira David Romão Batista (Examinadora Externa)

Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter permitido ingressar em uma pós-graduação e por ter dado condições e perseverança para a realização deste trabalho.

Ao núcleo familiar pelo apoio e incentivo, os quais, desde cedo buscaram e proporcionaram educação básica, escolar e superior.

Aos amigos e colegas que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a execução desta dissertação.

À empresa em que trabalho, TPF Engenharia, pelo incentivo à minha especialização. Em especial, ao meu líder por todo o suporte desde o início e flexibilização de minhas atividades.

Ao meu orientador, José Roberto Gonçalves de Azevedo, por ter aceitado orientar e acompanhar um tema tão complexo e desafiador.

RESUMO

A atividade minerária transforma a matéria prima em itens essenciais do dia a dia através do processo de beneficiamento, o qual resulta no rejeito, resíduo sem valor econômico. O rejeito deve ser armazenado em estruturas de contenção, as quais devem ser construídas conforme leis e normas que visam a segurança. O não atendimento aos padrões de segurança e a falta de controle de manutenção resultam em falhas e, em muitos casos, rompimentos, causando impactos ambientais, sociais e econômicos. O trabalho apresenta um estudo de ruptura hipotética de um reservatório de rejeito, utilizando análise bidimensional com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre os *softwares* de simulação de ruptura, o HEC-RAS 2D e o RiverFlow2D. Os resultados possibilitaram concluir que a análise comparativa convergiu para uma boa aproximação, bem como a validação e boa representação dos *softwares* para uma simulação de ruptura hipotética de barragens.

Palavras-chave: mineração; modelagem; simulação numérica; reservatório; mancha de inundação.

ABSTRACT

Mining activity transforms raw materials into essential day-to-day items, through the beneficiation process, which results in tailing, material with no economic value. This tailing must be stored in containment structures, which must be built in accordance with laws and standards aimed at safety. The non-attendance of this safety standards and lack of maintenance control results in failures and, in many cases, ruptures, causing environmental, social and economic impacts. The work presents a study of a hypothetical rupture of a tailing reservoir, using two-dimensional analysis aiming to make a comparative analysis between rupture simulation softwares, HEC-RAS 2D and RiverFlow2D. The results made it possible to conclude that the comparative analysis converged to a good approximation, as well as the validation and good representation of the softwares for a simulation of hypothetical dam failure.

Keywords: mining; modeling; numerical simulation; reservoir; flood stain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de tensão limite de escoamento versus concentração de sólidos. .	19
Figura 2 - Disposição de rejeitos em polpa.....	22
Figura 3 - Tanque espessador tipo <i>deep cone</i>	23
Figura 4 - Disposição de rejeitos em pasta.....	24
Figura 5 - Disposição de rejeitos em torta.	25
Figura 6 - Características de disposição de rejeitos de acordo com a concentração de sólidos presente no material.....	26
Figura 7 - Fases para construção de uma barragem.....	28
Figura 8 - Método construtivo de montante.	30
Figura 9 - Método construtivo de jusante.....	31
Figura 10 - Método construtivo de linha de centro.....	31
Figura 11 - Disposição de rejeitos em pilha cônica.	33
Figura 12 - Incidentes e acidentes em barragens de rejeitos, conforme ICOLD.	35
Figura 13 - Incidentes e acidentes em barragens de rejeitos, conforme Blight.	36
Figura 14 - Rompimento da barragem de Aznalcóllar na Espanha.	37
Figura 15 - Mancha de rejeitos no Lago Quesnel oriunda do rompimento da barragem de Mount Polley.....	38
Figura 16 - Rompimento da barragem B1 em Brumadinho.	39
Figura 17 - Causas de rupturas em barragens com altura superior a 15 m entre 1900 e 1973.....	40
Figura 18 - Causas de rupturas em barragens de rejeitos.....	41
Figura 19 - Morfologia de ruptura regressiva formada em uma ruptura por fluxo.	42
Figura 20 - Ruptura da barragem de Merriespruit – África do Sul.	43
Figura 21 - Influência da geometria na ruptura do reservatório.	43
Figura 22 - Condições de contorno no reservatório no período chuvoso.	44
Figura 23 - Condições de contorno no reservatório no período seco.	44
Figura 24 - Fases de uma ruptura por fluxo.....	48
Figura 25 - Curva de sedimentação.	50
Figura 26 - Linha de estado crítico.	53
Figura 27 - Proporcionalidade entre a linha SSL (linha de estado permanente ou steady state line) baseada em resistência não drenada e a linha SSL baseada em tensão efetiva de confinamento em escala logarítmica.	54

Figura 28 - Desencadeamento de liquefação estática e dinâmica.	56
Figura 29 - Trajetória de tensões para amostras sob mesmo índice de vazios.	57
Figura 30 - Superfície de fluxo por liquefação.	58
Figura 31 - Classificação dos fluidos reais.	60
Figura 32 - Comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo.	61
Figura 33 - Tensão de escoamento vs concentração gravimétrica para diversos tipos de rejeitos.	63
Figura 34 - Relações lineares tensão-deformação para fluidos Newtonianos e fluido Não-Newtoniano.	71
Figura 35 - Relação tensão de escoamento-coeficiente volumétrico (Cv) para os tipos de fluidos Não-Newtonianos.	72
Figura 36 - Etapas do estudo de trânsito de cheias.	77
Figura 37 - Curva cota-volume do reservatório de estudo.	80
Figura 38 - Curva cota-descarga do reservatório de estudo.	81
Figura 39 - Diagrama unifilar do modelo hidrológico.	83
Figura 40 - Etapas de um estudo de ruptura hipotética.	85
Figura 41 - Geometria e parâmetros da brecha de ruptura.	89
Figura 42 - Seções transversais utilizadas na análise comparativa.	94
Figura 43 - Hidrograma de ruptura do reservatório de estudo.	97
Figura 44 - Mancha de inundação do reservatório de estudo - HEC-RAS 2D.	98
Figura 45 - Mancha de inundação do reservatório de estudo - RiverFlow2D.	99
Figura 46 - Contorno das manchas de inundação - HEC-RAS 2D e RiverFlow2D.	100
Figura 47 – Nível de água + rejeito para a Seção 2 ao longo do tempo.	102
Figura 48 – Velocidades de escoamento para a seção 2 ao longo do tempo.	102
Figura 49 - Nível de água com rejeito para a seção 6 ao longo do tempo.	103
Figura 50 – Velocidades de escoamento para a seção 6 ao longo do tempo.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características de disposição de rejeitos de acordo com as concentrações.	20
Tabela 2 - Casos de ruptura de barragens de rejeitos.	34
Tabela 3 - Classificação do tipo de escoamento de acordo com o teor de sólidos volumétrico.	46
Tabela 4 - Parâmetros de tensão de escoamento para o Método Exponencial.	72
Tabela 5 - Coeficiente de calibração para a viscosidade dinâmica pelo método exponencial.	73
Tabela 6 - Tipos de condições de contorno disponíveis no RiverFlow2D.	75
Tabela 7 - Parâmetros físicos e hidrológicos da bacia de contribuição do reservatório de estudo.	79
Tabela 8 - Tempo de retorno mínimo em função do DPA.	82
Tabela 9 - Dados de entrada no modelo HEC-HMS.	91
Tabela 10 - Parâmetros reológicos utilizados na modelagem hidráulica.	92
Tabela 11 - Resultados do trânsito de cheias para o reservatório de estudo para PMP.	95
Tabela 12 - Parâmetros comparativos das manchas de inundação – HEC-RAS 2D e RiverFlow2D.	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	ATIVIDADE MINERÁRIA	16
3.1.1	Disposição de rejeitos provenientes da atividade minerária	16
3.1.1.1	Disposição de rejeitos pela concentração	17
3.1.1.1.1	<i>Disposição de rejeitos em polpa.....</i>	<i>22</i>
3.1.1.1.2	<i>Disposição de rejeitos espessados e em pasta.....</i>	<i>23</i>
3.1.1.1.3	<i>Disposição de rejeitos em torta</i>	<i>25</i>
3.1.1.2	Disposição de rejeitos pela estrutura	26
3.1.1.2.1	<i>Disposição de rejeitos em barragens</i>	<i>26</i>
<u>3.1.1.2.1.1</u>	<u>Métodos construtivos para barragens de rejeito de mineração</u>	<u>28</u>
3.1.1.2.2	<i>Disposição de rejeitos em empilhamentos drenados</i>	<i>31</i>
3.1.1.2.3	<i>Disposição de rejeitos em pilhas cônicas.....</i>	<i>32</i>
3.1.1.2.4	<i>Disposição de rejeitos em empilhamentos à seco (dry stacks)</i>	<i>33</i>
3.2	RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO E HISTÓRICO DE ACIDENTES.....	34
3.2.1	Histórico de acidentes	37
3.2.2	Causas de rupturas de barragens de rejeitos.....	39
3.2.3	Aspectos conceituais	41
3.2.3.1	Aspectos referentes à ruptura, à geometria do reservatório e às condições climáticas	42
3.2.3.2	Aspectos hidráulicos referentes ao fluxo do rejeito	45
3.2.4	Mecânica dos rejeitos	47
3.2.4.1	Sedimentação, adensamento e ressecamento dos rejeitos	49
3.2.4.2	Liquefação dos rejeitos	52
3.2.4.2.1	<i>Conceitos básicos</i>	<i>52</i>
3.2.4.2.2	<i>Susceptibilidade à liquefação.....</i>	<i>55</i>
3.2.4.3	Reologia dos rejeitos.....	58
3.2.4.3.1	<i>Lei da viscosidade de Newton.....</i>	<i>59</i>

3.2.4.3.2	<i>Fluidos newtonianos e não-newtonianos</i>	60
3.2.4.3.3	<i>Reologia dos rejeitos</i>	62
3.3	SEGURANÇA DE BARRAGENS	63
3.3.1	Legislação internacional de segurança de barragens	63
3.3.2	Legislação brasileira de segurança de barragens	64
4	MATERIAIS E MÉTODOS	67
4.1	MATERIAIS	67
4.1.1	Área de estudo	67
4.1.2	Dados de entrada	67
4.1.3	Softwares	68
4.1.3.1	Modelo HEC-HMS - abordagem hidrológica	68
4.1.3.2	Modelo HEC-RAS 2D - abordagem hidráulica	69
4.1.3.2.1	<i>Tensão de Escoamento</i>	71
4.1.3.2.2	<i>Viscosidade</i>	72
4.1.3.3	Modelo RiverFlow2D – abordagem hidráulica.....	73
4.2	MÉTODOS	75
4.2.1	Métodos hidrológicos	75
4.2.1.1	Estudos hidrológicos	76
4.2.1.1.1	<i>Estudos do trânsito de cheias</i>	76
<u>4.2.1.1.1.1</u>	<u>Caracterização física da bacia de contribuição</u>	<u>77</u>
<u>4.2.1.1.1.2</u>	<u>Chuvas intensas</u>	<u>79</u>
<u>4.2.1.1.1.3</u>	<u>Curva cota-volume</u>	<u>80</u>
<u>4.2.1.1.1.4</u>	<u>Curva cota-descarga do extravasor</u>	<u>80</u>
<u>4.2.1.1.1.5</u>	<u>Modelo hidrológico</u>	<u>81</u>
<u>4.2.1.1.1.6</u>	<u>Duração crítica, na máximo maximorum e borda livre remanescente</u> ..	<u>83</u>
4.2.2	Métodos hidráulicos	84
4.2.2.1	Síntese metodológica.....	84
4.2.2.2	Modo de falha.....	85
4.2.2.3	Cenário de simulação.....	86
4.2.2.4	Critérios e premissas.....	87
4.2.2.5	Parâmetros da brecha.....	88
4.2.2.6	Parâmetros reológicos	91
4.2.2.7	Critério de parada.....	92
4.2.2.8	Condição de courant	93

4.2.2.9	Seções transversais	94
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
5.1	TRÂNSITO DE CHEIAS	95
5.2	HIDROGRAMA DE RUPTURA	96
5.3	MANCHAS DE INUNDAÇÃO	97
5.4	NÍVEL DE ÁGUA COM REJEITO E VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	101
6	CONCLUSÕES	105
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	107
	REFERÊNCIAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

A mineração no Brasil é uma das atividades mais importantes no setor da economia, trazendo o Brasil como um dos países líderes nesse pilar. A exploração do minério pode ser realizada de várias formas e isso varia conforme a viabilidade econômica e técnica. Após a exploração do minério, este passa pelo processo de tratamento, denominado beneficiamento do minério, em que será modificado em matéria-prima para a indústria.

O beneficiamento do minério envolve as operações de britagem, moagem, filtragem e secagem. O resultado deste processo é o rejeito, material sem valor econômico, o qual é armazenado em estruturas de contenção ou disposição de rejeitos, as barragens, reservatórios em geral.

De forma geral, existem várias formas de armazenar o rejeito. O rejeito seco pode ser disposto em pilhas, já o rejeito em polpa, geralmente é bombeado ou direcionado por gravidade até as barragens de rejeito, as quais, geralmente, recebem esse material com 30% do volume sólido e 70% do volume de água (Espósito, 2000).

No entanto, as barragens são susceptíveis a falhas e, dependendo da sua classificação de risco, podem gerar danos a jusante catastróficos, causando diversos impactos ambientais, sociais e econômicos. Além disso, muitas barragens armazenam rejeitos com elevado índice de contaminação, associados a alto risco decorrente de sua ruptura. A utilização de boas práticas de engenharia e geotecnia, o atendimento às leis e normas para projetos de barragens previnem e evitam rupturas ou incidentes em barragens, assim como as boas práticas de monitoramento e controle dessas estruturas.

De forma geral, de acordo com Vick (1984), a probabilidade de uma barragem de rejeitos falhar está relacionada diretamente com o tipo de material armazenado e o tipo de disposição do rejeito naquele reservatório. Diante disso, o conhecimento da mancha de inundação, assim como as consequências advindas da ruptura de uma barragem é imprescindível, pois consistem em recursos para classificação de risco, planejamento em situações de emergência e valoração dos danos associados.

É possível considerar que, em barragens de rejeitos, o comportamento do material após a ruptura se adequa a fluxos hiperconcentrados, considerados fluidos Não-Newtonianos, os quais possuem propriedades reológicas específicas,

diferentemente dos fluidos Newtonianos. Portanto, o estudo reológico do rejeito é essencial para compreensão do seu comportamento no fluxo pós ruptura.

A grande motivação acerca do tema do presente trabalho é a carência de estudos específicos envolvendo ruptura em barragens de rejeitos (Matos e Eleutério 2019), principalmente devido ao fato que modelos hidráulicos que permitem a simulação de fluidos Não-Newtonianos começaram a ser desenvolvidos há pouco tempo (Machado, 2017). Além disso, as duas maiores catástrofes, no que tange a danos ambientais e de vida, envolvendo rupturas de barragens de rejeitos, em Mariana-MG no ano de 2015 e em Brumadinho-MG no ano de 2019, elevou a importância da problemática envolvendo a segurança dessas estruturas, despertando o interesse em aprofundar as pesquisas voltadas a esta temática. Diante disso, o objetivo do trabalho é apresentar a comparação da mancha de inundação originada a partir de dois *softwares*, com a finalidade de obter análises comparativas e conclusivas acerca do desempenho, vantagens e desvantagens dos mesmos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo comparativo entre os resultados obtidos em dois *softwares* a partir da modelagem de uma ruptura hipotética de um reservatório de rejeito.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o estudo de trânsito de cheias a fim de obter a cota gatilho de ruptura;
- Realizar a modelagem hidrológica a fim de obter o hidrograma de ruptura a partir de dados hidrológicos e parâmetros físicos da bacia no HEC-HMS;
- Desenvolver a propagação da onda de cheia formada a partir da brecha nos softwares HEC-RAS 2D e RiverFlow2D, visando obter os mapas de inundação, bem como a análise de suas características e parâmetros;
- Realizar estudo comparativo entre as metodologias.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ATIVIDADE MINERÁRIA

A atividade de mineração no Brasil é considerada um dos principais protagonistas na sustentação da economia do país devido ao alto potencial do solo brasileiro, caracterizado por uma alta riqueza. Nesse contexto, a principal *commoditie* exportada pelo Brasil é o minério de ferro, que vem tendo seu valor de exportação nacional cada vez mais elevado (VALE, 2017).

Trazendo benefícios como equilíbrio econômico, influência no PIB nacional e gerando índices elevados de empregos no país, a mineração cresce cada vez mais. Em 2020, o setor minerário faturou cerca de 209 bilhões de reais, já no ano seguinte, esse valor foi de aproximadamente 339 bilhões de reais (IBRAM, 2022).

No tocante a exportação, em outubro de 2020, o Brasil exportou cerca de 107,8 milhões de toneladas de minérios, dos quais 103 milhões de toneladas correspondem a exportação de minério de ferro, um dos maiores negócios de comércio exterior do setor mineral brasileiro. Já no que tange aos investimentos, no período de 2017 a 2021, foram previstos cerca de 18 bilhões de dólares para o setor da mineração, aumentando a cada ano e chegando a 37,1 bilhões de dólares previstos para 2024 (IBRAM, 2020).

De acordo com o IBRAM (2019), o Brasil possui cerca de 9.415 empresas atuando na mineração do país, sendo 87% pequenas e microempresas, atuando na extração não só de minério de ferro, mas em diversos outros minerais que existem no território brasileiro.

3.1.1 Disposição de rejeitos provenientes da atividade minerária

De acordo com a Geoestável (2022), o material resultante do processo de beneficiamento do minério é denominado “rejeito”, devendo este ser disposto em estruturas de maneira adequada e em locais licenciados pelos órgãos ambientais competentes. Nesse contexto, as estruturas adequadas e mais usuais consistem nas pilhas e barragens/diques.

A NBR 13.028/2017 (ABNT, 2017) - “Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e

reservação de água - Requisitos” estabelece os elementos mínimos e obrigatórios para elaboração de projetos de barragens de mineração, com o objetivo de promover a segurança e minimizar os impactos ambientais.

A dificuldade em obter outorgas para captação de água em processos de beneficiamento do minério, a escassez de áreas disponíveis para disposição, maiores exigências de órgãos ambientais e, principalmente, recentes acidentes de rupturas e vazamentos, contribuíram para a elaboração e evolução de técnicas mais refinadas para a disposição de rejeitos (Ribeiro, 2015).

Durante a fase de estudos de alternativas de disposição de rejeitos, alguns critérios são avaliados para a definição do tipo de disposição em determinado local. A possibilidade de obtenção de outorga de água para o processo de desaguamento de rejeitos consiste em uma questão importante para a tomada de decisão devido a dificuldade e ao elevado custo atrelado. Outro critério avaliado é o transporte dos rejeitos da usina de beneficiamento até o local de disposição final. De maneira geral, quanto mais concentrado o rejeito, mais elevado é o custo de transporte.

Os processos de disposição podem se dar pela concentração de rejeitos (polpa, pasta ou torta) ou pela sua estrutura (empilhamentos drenados ou barragens). Entretanto, em termos econômicos, o mais usual são as barragens de rejeitos, muitas vezes utilizando o próprio rejeito na estrutura do barramento.

Vale ainda ressaltar que o método de disposição estabelecido, juntamente com a composição da polpa, como distribuição granulométrica, geometria dos grãos, textura, densidade, entre outros parâmetros, determinam o tipo de comportamento de segregação do material (Lozano, 2006).

3.1.1.1 Disposição de rejeitos pela concentração

O nível de concentração nos rejeitos é definido pela quantidade de água presente no material. Dessa forma, são utilizados dois índices de estado, os quais avaliam a relação água/sólidos existente na massa de rejeito. O teor de sólido volumétrico (C_v) corresponde a relação entre o volume de sólidos existente e o volume total, conforme a Equação 1 e o teor de sólido gravimétrico (C_w) consiste na relação da massa de sólidos e massa total de rejeitos, conforme a equação 2.

$$Cv = \frac{Vs}{V} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde,

- Cv corresponde ao teor de sólidos volumétrico em %;
- Vs é o volume de sólidos em m³;
- V corresponde ao volume total em m³;

$$Cw = \frac{Ms}{M} \cdot 100\% \quad (2)$$

Onde,

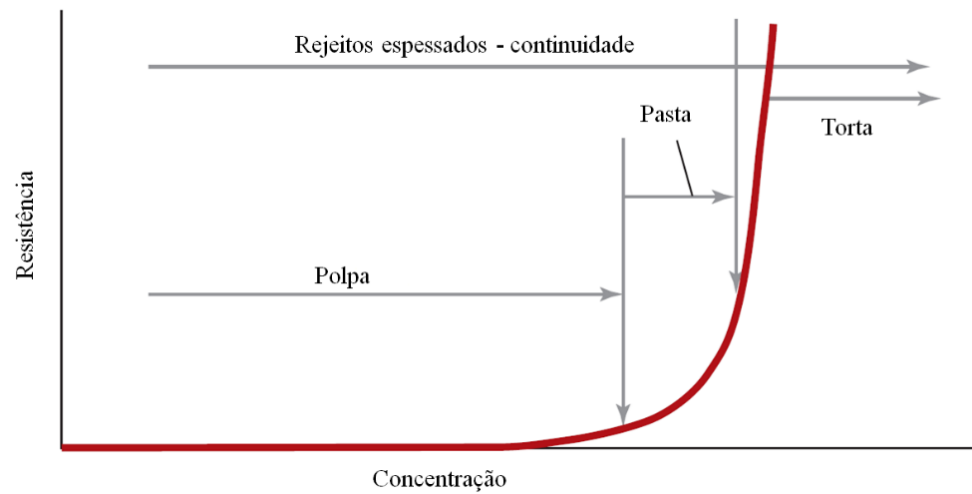
- Cw corresponde ao teor de sólidos gravimétrico em %;
- Ms é a massa de sólidos em kg;
- M corresponde a massa total em kg;

Um conceito importante nesse contexto é a disposição de rejeitos espessados, que consiste na elevação da concentração de sólidos através de desaguamento da polpa, e, para a realização desse processo, são utilizados espessadores para separar a parte líquida da parte sólida do rejeito (Portes, 2013). A partir desse processo, é possível conhecer a reologia do material, sendo esta a ciência voltada para a análise das condições de fluxo para as diversas concentrações do rejeito.

A viscosidade e a tensão limite de escoamento, principais parâmetros reológicos do rejeito, variam de acordo com o teor de sólidos (concentração volumétrica) do rejeito de forma exponencial (Boger, 2013).

Ainda de acordo com Boger (2013), existem variáveis que influenciam no comportamento do rejeito, não possibilitando caracterizá-los como sólidos ou fluidos. É possível aplicar intervalos de tensões a materiais distintos e observar sólidos tendo comportamento como líquidos e vice-versa. A Figura 1 apresenta a relação entre a tensão limite de escoamento e concentração de sólidos (consistência) nas classes polpa, pasta e torta.

Figura 1 - Curva de tensão limite de escoamento versus concentração de sólidos



Fonte: Boger (2013).

De acordo com o gráfico, nota-se que a resistência ao escoamento do rejeito se eleva de acordo com o aumento da concentração de sólidos, sendo um aspecto favorecido com a técnica de disposição de rejeitos espessados.

Segundo Ribeiro (2015), o rejeito em polpa possui baixas concentrações de sólidos, com teor de sólido gravimétrico entre 30% e 40%, correspondendo a maior parte dos rejeitos originados a partir dos processos de beneficiamento no Brasil. Rejeitos espessados são rejeitos que passaram por processos mecânicos de espessamento e estes possuem teor de sólido gravimétrico entre 45% e 65%. O rejeito em pasta possui um valor de concentração de sólidos intermediária, com teor de sólido gravimétrico entre 65% e 70%, e o rejeito em torta possui alta concentração de sólidos, com teor de sólido gravimétrico entre 80% e 85%.

Conforme Davies (2011), é possível observar características específicas de disposições de rejeitos de acordo com a concentração. Tais características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características de disposição de rejeitos de acordo com as concentrações

	Polpa convencional	Espeessado	Pasta	Torta
Estruturas de desaguamento¹	Nenhuma (ciclones podem ser utilizados)	Coagulantes/Floculantes/Ciclones/Espessadores/Modificadores químicos	Espessadores do tipo "Deep bed" aditivos	Filtros (vácuo ou pressão)
Teor de sólidos gravimétrico típico (Cw)²	30-40%	45-65%	65-70%	80-85% (não saturado)
Transporte típico	Bombas centrífugas	Bombas de deslocamento positivo/redutores de viscosidade		Caminhões esteiras
Água percolada	Finos para lago com volume significativo de água a ser manejada	Volume de água considerável a ser manejado	Pequeno ou nenhum volume de água a ser manejado	Apenas consolidação - água percolada pode ser negligenciada
Características dos rejeitos depositados	Segregáveis	Possivelmente segregáveis	Não segregáveis	Aspecto de solo (não segregáveis)
Modelo de resistência aplicável	Reologia	Reologia	Transição para mecânica dos solos	Aspecto de solo (não segregáveis)
Ângulos de praia	Suave com concavidade	Concavidade menor, levemente mais íngreme que o método convencional. Praia forma fluxo em canais	"Sheet Flow", com possibilidade de ocorrência de canalização. Formação de praia pode ser inibida pela resistência	N.A
Deformações pós deposição (consolidação)	Adensamento a grandes deformações		Próximo de modelos tradicionais da mecânica dos solos	Modelos tradicionais da mecânica dos solos

	Polpa convencional	Espejado	Pasta	Torta
Retenção dos rejeitos	Estruturas de retenção para todos os métodos de disposição subárea	Podem ser auto sustentados em ângulos de deposição muito baixos. Estruturas de retenção são ainda necessárias	Podem ser auto sustentáveis em ângulos modestos, têm potencial para disposição com estruturas de disposição mínimas	Auto sustentáveis em altos ângulos de deposição, dispensam estruturas de retenção
¹ Centrífugas não listadas, podem desenvolver concentração intermediária entre pasta e torta ² Densidades típicas para minerais de rejeitos de mineração de metais. Variação no comportamento para outros tipos de materiais minerais podem ser esperadas				

Fonte: Davies (2011).

3.1.1.1.1 Disposição de rejeitos em polpa

De maneira geral, os rejeitos são dispostos em forma de polpa devido à grande quantidade de água envolvida no processo (cerca de 70%) e são transportados por tubulações de descarga, operando por gravidade, denominadas rejeitodutos ou por bombeamento (espigotes).

No tocante à disposição do rejeito, é necessário a utilização de técnicas que reduzam a pressão no lançamento da polpa na estrutura de contenção, visando melhorar a segregação hidráulica do material e reduzir a variação dos parâmetros de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica (Silva, 2010).

No Brasil, de acordo com Portes (2013), a disposição de rejeitos sob a forma de polpa confere maiores riscos, pois acarreta impactos agravantes ao meio ambiente devido à necessidade de grandes áreas para a ocupação da bacia de rejeitos, além de consistir em uma técnica que exige grandes estruturas de contenção.

A Figura 2 apresenta o método de disposição de rejeitos em polpa.

Figura 2 - Disposição de rejeitos em polpa.

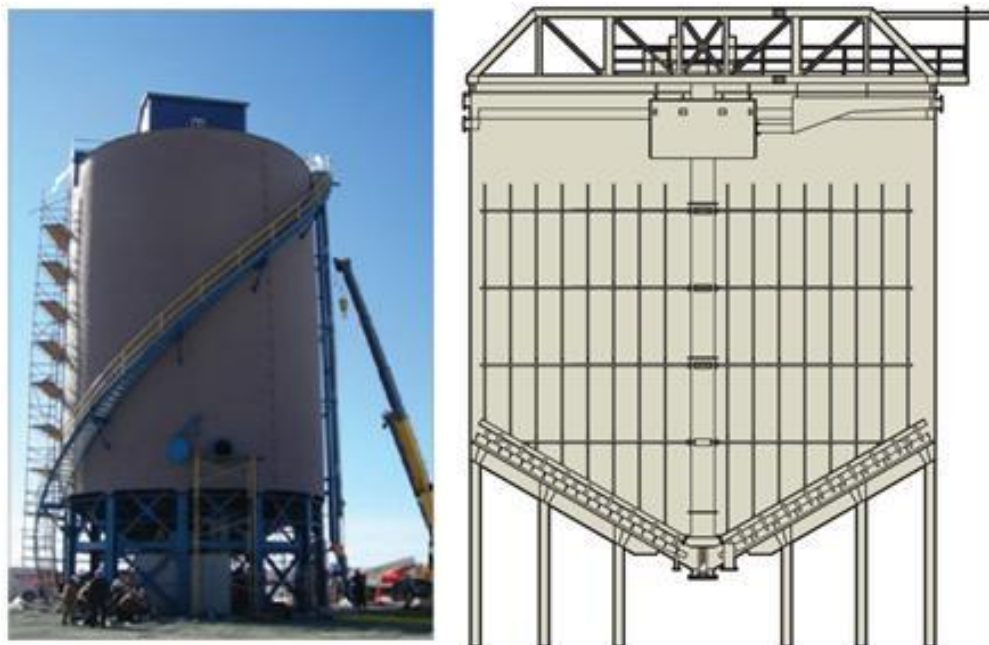


Fonte: Metso Outotec (2017).

3.1.1.1.2 Disposição de rejeitos espessados e em pasta

Os rejeitos espessados são produzidos a partir do processo de espessamento. Esse processo é realizado em tanques espessadores, onde ocorre a alimentação da polpa para a realização da sedimentação posterior, conforme apresentado na Figura 3. Com o objetivo de acelerar a sedimentação, utilizam-se reagentes, os quais alteram as características do rejeito. Dessa forma, a água clarificada no tanque, após o processo de sedimentação, transborda, e os sedimentos são descartados no fundo do tanque (Portes, 2013).

Figura 3 - Tanque espessador tipo *deep cone*.



Fonte: Santos (2012).

A grande vantagem desse processo é a recuperação da água na planta de beneficiamento, gerando um ciclo de reuso, reduzindo perdas e evitando a necessidade de captação de água nova.

De acordo com Araujo *et al.* (2003, apud Osorio, 2005), a disposição dos rejeitos em pasta consiste em um fluido homogêneo, sem segregação de partículas e drenagem significativa de água, em caso de disposição suave, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Disposição de rejeitos em pasta



Fonte: Santos (2012).

A disposição do rejeito em pasta pode ser realizada em áreas planas ou irregulares, através de lançamento por sistema de torre central ou sistema de bombeamento. Em áreas planas, o rejeito é distribuído de maneira uniforme, já em terrenos irregulares, o rejeito se conforma de acordo com a topografia local.

O transporte do rejeito em pasta é realizado através de bombeamento, o qual atribui maiores pressões ao material no ato do lançamento e sua disposição gera comportamento similar a solos naturais, facilitando posterior processo de reabilitação da área.

Segundo Ribeiro (2015), é possível destacar as vantagens obtidas na disposição de rejeitos em pasta, como: redução dos efluentes devido à presença de uma menor quantidade de água; redução da entrada de ar no maciço da barragem devido a um menor índice de vazios no rejeito; tempo de acesso minimizado sobre os rejeitos; facilidade no descomissionamento da estrutura; redução de riscos de ruptura devido à presença de pouca água na pasta e aumento da capacidade volumétrica da estrutura devido à disposição do rejeito sob ângulos maiores.

3.1.1.1.3 Disposição de rejeitos em torta

Os rejeitos em torta são originados a partir do processo de filtração de sólidos em suspensão, caracterizando uma massa não saturada similar a um solo. Esse tipo de disposição de rejeitos confere menor volume em comparação aos outros e o rejeito passa a ser denominado como rejeito filtrado (Figura 5).

Figura 5 - Disposição de rejeitos em torta



Fonte: Diário Popular (2018).

Especificamente, de acordo com Lara *et al.* (2013), o processo de filtração do rejeito é mais favorecido quando existe uma menor porcentagem possível de partículas finas ($< 2 \mu\text{m}$), elevada massa específica dos grãos e baixos teores de argila, tornando o processo mais eficiente. Sobretudo, visando elevar as taxas de filtragem, são realizadas operações de espessamento antes do processo de filtragem.

Devido à elevada resistência presente no rejeito em torta, não é possível realizar seu transporte através de tubulações, sendo assim, é necessário o transporte de caminhões ou correias transportadoras.

A principal vantagem da disposição de rejeitos em torta é a não existência de descarga nos rejeitos, favorecendo a disposição de rejeitos não inertes. Entretanto, ainda que quase inexistente as partículas de água, torna-se necessário a implantação de estruturas de contenção à estrutura, devido a processos de erosão

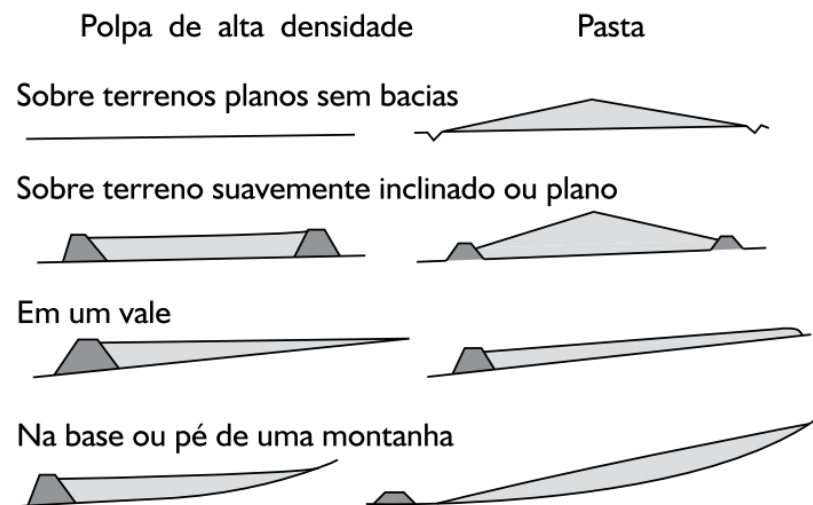
eólica e pluvial.

3.1.1.2 Disposição de rejeitos pela estrutura

De acordo com Abrão (1987), existem diversas tecnologias voltadas para a disposição no tocante à estrutura formada a partir do rejeito disposto, a qual pode ser realizada em áreas superficiais ou subterrâneas. Neste item do trabalho, serão apresentadas as formas de disposição de rejeitos.

Em relação à disposição do rejeito, as técnicas realizadas consideram as características geotécnicas do material, a concentração e as características geológicas e topográficas do local a ser disposto o rejeito. A Figura 6 apresenta as características de disposição de rejeitos de acordo com a concentração de sólidos presente no material (Laudrialt, 2002, apud Ribeiro, 2015).

Figura 6 - Características de disposição de rejeitos de acordo com a concentração de sólidos presente no material.



Fonte: Adaptado de Laudrialt (2002), apud Ribeiro (2015).

3.1.1.2.1 Disposição de rejeitos em barragens

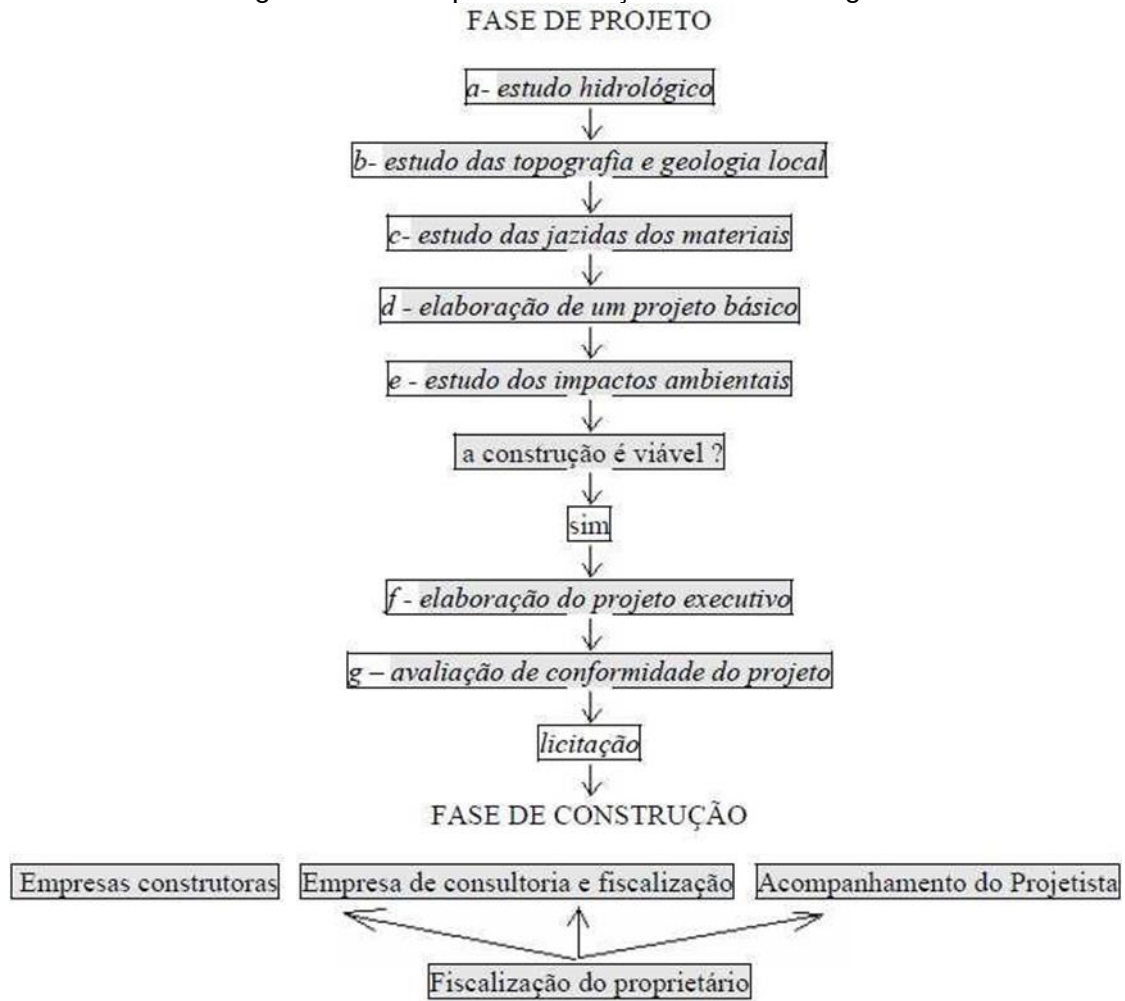
Barragens ou reservatórios são as estruturas mais utilizadas para disposição de rejeitos, geralmente na concentração de polpa. Sendo assim, barragens de rejeito de mineração possuem a finalidade de receber o rejeito advindo do processo de beneficiamento de um mineral. Utilizados também como material de construção, os rejeitos em polpa consistem em uma técnica para aterro hidráulico de barragens com custo reduzido e caracterizando uma maior viabilidade econômica. De acordo com

Kupper (1991), os principais fatores observados no rejeito para compor o aterro são a granulometria, teor de sólidos, formato dos grãos, vazão e método de descarga. Sendo assim, geralmente constroi-se o dique de partida em solo compactado e realiza-se os alteamentos na estrutura.

No tocante ao maciço de contenção da barragem, este pode ser construído com material natural, como solo e enrocamento, ou com rejeitos. Solo e enrocamento conferem uma maior segurança hídrica, visto que apresentam melhor controle da superfície freática e oferece grande vantagem ao reservatório, possibilitando a descarga do rejeito ocorrer a montante.

De acordo com Duarte (2008), para a construção de uma barragem, é necessário a elaboração de duas fases: a fase de projeto e a fase de construção. Na fase de projeto, são elaborados estudos voltados a hidrologia local, topografia, geologia e jazidas de materiais. Além disso, é elaborado o projeto básico, assim como a avaliação dos impactos ambientais e viabilidade da construção. A partir disso, caso a viabilidade seja positiva, elabora-se o projeto executivo e passa para a fase de licitação. Já na fase de construção, avalia-se a contratação das empresas construtoras, consultoras e fiscalizadoras. A Figura 7 apresenta as fases detalhadas para a construção de uma barragem.

Figura 7 - Fases para construção de uma barragem



Fonte: Duarte (2008).

3.1.1.2.1.1 Métodos construtivos para barragens de rejeito de mineração

De maneira geral, de acordo com Lozano (2006), as barragens construídas com rejeitos são caracterizadas por possuírem parâmetros geotécnicos inferiores, com possibilidade de redução em sua resistência estrutural em situações de despejo de altas pressões repentinas, possuindo um comportamento similar a um aterro hidráulico. Já as barragens construídas com materiais de empréstimo ou estéreis proveniente das lavras possuem parâmetros geotécnicos melhores, assim como sua resistência estrutural.

Em relação aos métodos construtivos, as barragens podem ser construídas através de alteamentos a montante, a jusante ou pelo método da linha de centro. Conforme Soares (2010), essas denominações dependem do deslocamento do eixo

da barragem durante seu alteamento e a escolha do tipo de método construtivo é feita após análise de variáveis, são elas: topografia, hidrologia, geologia, granulometria e concentração dos rejeitos, velocidade de deposição, variação da capacidade de armazenamento do reservatório com o aumento da altura, tipos e propriedades do subsolo, disponibilidade de equipamentos de terraplanagem, processo de compactação e equipes de controle.

➤ Método de montante

O método de construção por montante (Figura 8) consiste na forma mais simplificada e antiga de construção de barragens de rejeitos. De acordo com Albuquerque Filho (2004), esse método considera um dique de partida de terra compactada ou enrocamento e então é lançado o rejeito a montante formando uma praia de rejeitos, a qual servirá de fundação para o próximo alteamento. Assim é feito o processo, o qual é contínuo e repetitivo até que se atinja a cota final prevista em projeto para a crista da barragem.

Esse era o método mais utilizado para construção de barragens de mineração devido ao baixo custo associado, facilidade de execução, necessidade de poucos equipamentos de terraplanagem, baixo volume necessário nas etapas construtivas e maior rapidez de alteamento. Entretanto, é um método que confere maior risco à estrutura e ao vale a jusante. De acordo com Soares (2010), os rejeitos consistem em materiais caracterizados por possuir saturação total e baixa permeabilidade. Ao receber despejos de camadas de rejeitos ou qualquer pressão externa repentina, como por exemplo terremotos, a camada sólida pode passar a se comportar como líquido, caracterizando o processo de liquefação, o qual consiste em uma das mais comuns causas de rompimentos de barragens de mineração. Durante o processo, pode ser necessário entubamento, o que pode causar surgimento de água na superfície do talude de jusante, sendo assim, um método que confere menor coeficiente de segurança.

Figura 8 - Método construtivo de montante.



Fonte: Adaptado de Vick (1983).

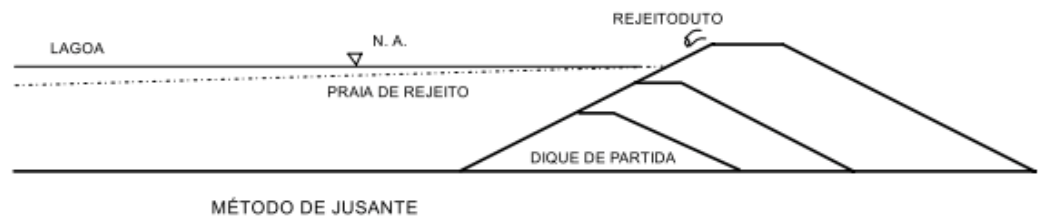
Após casos de rompimentos (*dam break*) de barragens, como o acidente na Barragem dos Macacos no ano de 2001 em Nova Lima-MG, o rompimento da Barragem do Fundão no ano de 2015 em Mariana-MG e, principalmente, o acidente em Brumadinho no ano de 2019, entre outros casos, passou a ser proibido a utilização do método construtivo por alteamento a montante através da Resolução ANM nº 4/2019 (Brasil, 2019), atual Resolução nº 95/2022 (ANM, 2022) e Resolução nº 130/2023 (ANM, 2020). Além disso, passou a ser obrigatório o descomissionamento e descaracterização de estruturas já existentes construídas por esse método construtivo, conforme o Art. 8º.

➤ Método de jusante

Conforme Lozano (2006), no método de jusante (Figura 9), o eixo da barragem se desloca para jusante até atingir a cota da crista de projeto, considerando um dique de partida de material impermeável, devendo dispor de sistema de drenagem interna com tapete drenante e filtro vertical, visando melhor controle da superfície freática. Quando o material utilizado nos alteamentos é o rejeito, deve ser utilizado métodos de separação para desagregar a fração grossa da fração fina e utilizar somente a fração grossa no corpo da barragem.

Esse método confere melhores condições de estabilidade, consequentemente maior segurança à estrutura, pois o maciço se eleva sobre o material compactado, possuindo a fundação no solo. Apesar de conferir maior segurança, como desvantagens, esse método atribui maior custo operacional e volume de aterro compactado.

Figura 9 - Método construtivo de jusante.

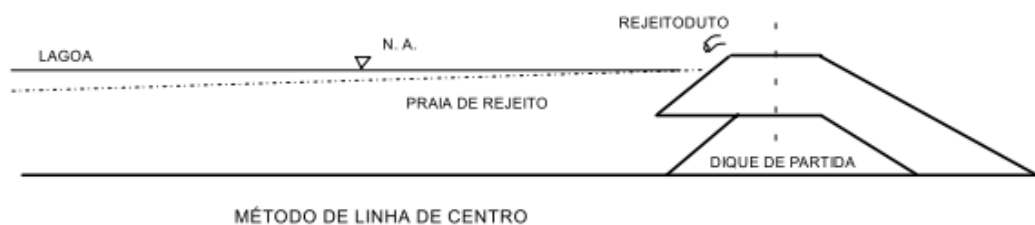


Fonte: Adaptado de Vick (1983).

➤ Método de linha de centro

O método de linha de centro (Figura 10) consiste em uma combinação dos métodos de jusante e montante, onde parte dos rejeitos é apoiada sobre a praia depositada e a outra parte é apoiada a jusante. O desempenho da estrutura é semelhante ao método de jusante, com o alteamento da crista feito de forma vertical. Além disso, é possível afirmar que, em termos de custo operacional, o método de linha de centro é classificado como o intermediário entre os demais métodos citados anteriormente.

Figura 10 - Método construtivo de linha de centro.



Fonte: Adaptado de Vick (1983).

3.1.1.2.2 Disposição de rejeitos em empilhamentos drenados

Os empilhamentos drenados consistem em uma disposição sob a forma de pilha formado por materiais mais granulares e que possui um sistema de drenagem interno, o qual libera a água com uma considerável capacidade de vazão.

Similar a uma barragem de contenção de rejeitos, os empilhamentos drenados diferem por possuírem um sistema de drenagem interna para garantir o fluxo gravitacional, entretanto, nada impede a implantação de sistemas de drenagem superficial visando garantir uma rápida remoção da água acumulada, especialmente

de períodos chuvosos.

De acordo com Gomes (2009), o primeiro lançamento é realizado através de um dique de partida com vários pontos de descarga e os alteamentos sucessivos são realizados sob o rejeito com o auxílio de equipamentos específicos. A partir de cada alteamento, as tubulações de lançamento de rejeitos são realocadas para a nova crista construída, continuando, assim, o processo, até atingir a cota desejada da altura da pilha.

Dentre as vantagens do tipo de disposição de rejeitos em empilhamentos drenados, é possível destacar a obtenção de um maciço não saturado e com maior estabilidade, obtenção de um menor potencial de dano em um evento de ruptura e a utilização de um método de montante seguro, com baixo risco de ruptura e liquefação. Já em relação as desvantagens, esse método de disposição não é aplicável em rejeitos finos devido à baixa permeabilidade apresentada, dificultando, assim, o fluxo de água.

3.1.1.2.3 Disposição de rejeitos em pilhas cônicas

A disposição de rejeitos em pilhas cônicas é um método aplicável somente para rejeitos em pasta devido aos ângulos até 10° ou mais que podem ser formados nas praias a partir do lançamento (Landriault, 2002).

Essa técnica de disposição de rejeitos elimina a necessidade de grandes estruturas de contenção, facilitando a disposição em áreas planas e reduzindo o custo. Quanto à disposição, são utilizadas torres centrais devido aos elevados ângulos que podem ser formados, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Disposição de rejeitos em pilha cônica.



Fonte: Ribeiro (2015).

Vale ressaltar que, ainda que essa técnica de disposição de rejeitos elimine a necessidade de grandes estruturas de contenção, a mesma exige a existência de um dique para receber os afluentes da pilha e conter os sedimentos.

3.1.1.2.4 Disposição de rejeitos em empilhamentos à seco (dry stacks)

Os empilhamentos à seco, conhecido como *dry stacks*, consistem em uma técnica aplicada para rejeitos em concentração de torta, diminuindo significativamente o volume de rejeitos e os impactos. A principal vantagem dessa técnica é o elevado nível de recuperação da água na planta, caracterizando uma técnica atrativa pelo seu baixo custo. Portanto, é um método atraente para regiões de índices baixos de precipitação (Lara *et al*, 2013).

A disposição dos rejeitos ocorrem com o auxílio de caminhões e/ou correias transportadoras e, no tocante à necessidade de compactação, essa decisão depende das condições topográficas e grau de sismicidade da região de implantação do empilhamento. Em locais com alta inclinação e alto risco sísmico, a compactação torna-se necessária, entretanto, em locais com baixo risco sísmico e baixa inclinação, não torna-se necessário esse procedimento.

No tocante às vantagens dessa técnica, além do alto índice de recuperação

da água na planta pode-se destacar o baixo risco de liquefação na estrutura, consequentemente, torna-se baixo o risco de rupturas. Além disso, o acesso à estrutura é facilitado na maior parte do tempo e a revegetação pode ser realizada simultaneamente com a operação.

3.2 RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO E HISTÓRICO DE ACIDENTES

De acordo com Bryant *et al.* (1983), acidentes de rupturas em estruturas de contenção de rejeitos geram grandes distâncias de fluxo, acarretando em diversos riscos à segurança do vale a jusante e afetando a economia e meio ambiente.

Como citado por Rocha (2015), o prejuízo causado para a mineradora, em um caso de ruptura, é extremamente caro, levando a paralização permanente ou temporárias das atividades, além de multas. Os danos ambientais são catastróficos e as perdas são grandes para a sociedade.

O histórico de acidentes de ruptura de barragens de rejeitos remete a casos catastróficos que ocorreram no mundo, como se pode observar na Tabela 2, a qual apresenta acidentes envolvendo barragens de rejeitos.

Tabela 2 - Casos de ruptura de barragens de rejeitos.

Ano	Localização	Nº vítimas fatais	Minério
mar/00	România	-	Cobre, Chumbo, Zinco
jun/01	Brasil	2	Ferro
Ago/Set/2002	Filipinas	-	-
ago/03	Macedônia	-	Chumbo-Zinco
nov/04	Canadá	-	Mercúrio
abr/05	EUA	-	Fosfato
abr/06	China	-	Ouro
nov/07	China	10	Ferro
set/08	China	277	Ferro
ago/09	Rússia	1	Ouro
out/10	Hungria	-	Bauxita
jul/11	China	-	Manganês
dez/12	Canadá	-	Cobre
jan/13	México	4	Ouro-Prata
fev/14	EUA	-	Carvão
nov/15	Brasil	19	Ferro
ago/16	Chile	-	Cobre
mar/17	China	2	Ouro, Cobre, Ferro, Prata

Ano	Localização	Nº vítimas fatais	Minério
fev/18	Brasil	-	Bauxita
mar/18	Austrália	-	Ouro, Cobre
jan/19	Brasil	270	Ferro
mar/19	Brasil	-	Estanho
mai/20	México	-	Zinco, Chumbo
dez/21	África do Sul	-	Carvão
jan/22	Brasil	-	Ferro

Fonte: Adaptado de Wise Uranium (2022).

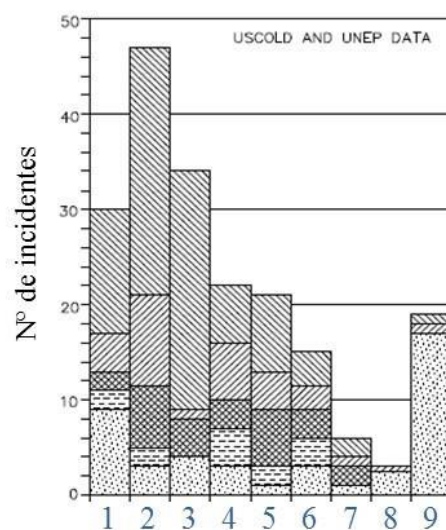
Segundo ICOLD (2001), *International Commission on Large Dams*, o percentual de casos de acidentes de rupturas de barragens de rejeitos é consideravelmente maior que os casos de rupturas de barragens de água, com valor de 1,2% para barragens de rejeitos e cerca de 0,01% para barragens de água. Vale ressaltar que nem todos os proprietários de barragens relatam incidentes ou acidentes ocorridos devido ao receio de multas e sanções.

Ainda de acordo com ICOLD (2001), a maior causa de rupturas de barragens se dá por galgamento e principalmente em barragens construídas pelo método construtivo de alçamento a montante, conforme apresentado na Figura 12. Já conforme Blight (2010), a principal causa de rupturas de barragens é a instabilidade de taludes, como apresentado na Figura 13.

Figura 12 - Incidentes e acidentes em barragens de rejeitos, conforme ICOLD.

Causa da ruptura

1. Galgamento
2. Instabilidade de taludes
3. Terremoto
4. Fundação
5. Percolação
6. Estrutural
7. Erosão
8. Subsistência de mina
9. Desconhecido

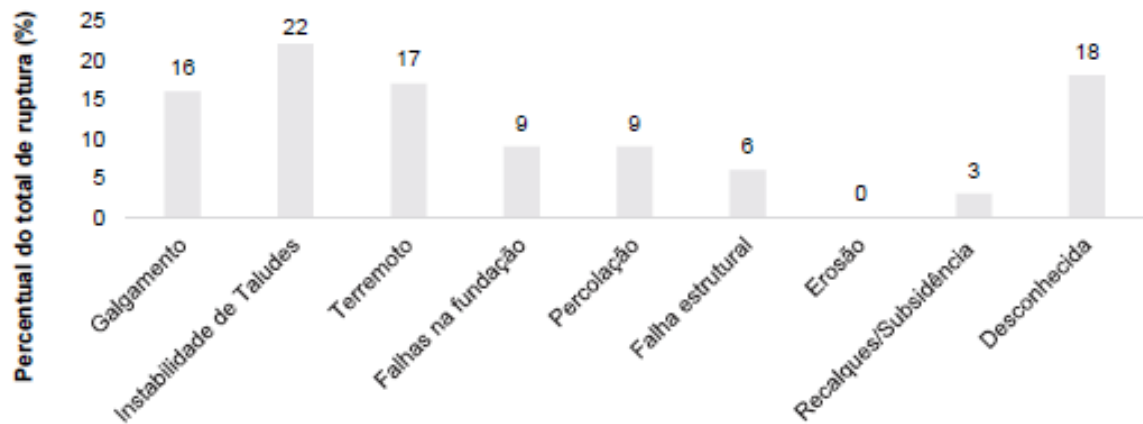


Método Construtivo

- Montante
- Retenção de água
- Jusante
- Linha de centro
- Desconhecido

Fonte: Adaptado de ICOLD (2001).

Figura 13 - Incidentes e acidentes em barragens de rejeitos, conforme Blight.



Fonte: Adaptado de Blight (2010).

Até 2020, no Brasil, de 830 barragens de mineração cadastradas, somente 428 estão em consonância com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), conforme a Agência Nacional de Mineração (ANM). Ou seja, pouco mais que a metade das barragens cadastradas no país (51,5%) estão fora dos padrões de segurança.

Para compreender melhor o fenômeno de ruptura em barragens e obter ferramentas que auxiliem a previsão de novas falhas, pode-se iniciar avaliando as rupturas históricas. Conforme pesquisa apresentada por Morgado (2022), o levantamento do histórico de rompimento de barragens no Brasil iniciou através do contato com a ANM, visando confirmar os registros de ruptura disponibilizados ao público. Conforme relatado pela agência, até maio de 2020, nove barragens haviam rompido, das quais seis foram construídas pelo método de montante, correspondendo a 67%. Dessas, 80% possuíam causa principal do rompimento a falha na drenagem e problema na forma de disposição dos rejeitos, avançando para a ocorrência do fenômeno da liquefação, fenômeno este o principal motivo do rompimento das duas maiores recentes rupturas ocorridas no Brasil, nos anos de 2015 e 2019.

3.2.1 Histórico de acidentes

✓ Barragem Aznalcóllar, Espanha

De acordo com Rico *et al.* (2008), rupturas catastróficas possuem alto potencial de devastação econômica e ambiental, seguindo como exemplo o caso da barragem Aznalcóllar (Figura 14), na Espanha, em 1998, a qual liberou cerca de 4 a 5 milhões de metros cúbicos de rejeitos no vale a jusante. Responsável por conter rejeitos de mineração de zinco, a causa do rompimento da barragem estava associada à falhas em aspectos geotécnicos da estrutura que resultou no rompimento de uma das paredes da barragem, além de aspectos que favoreceram o processo de liquefação.

No tocante às perdas socioeconômicas, o rompimento da barragem Aznalcóllar gerou cerca de €152 milhões, dos quais €147 milhões foram gastos para reparar os impactos ambientais e à produção agrícola, e €5 milhões foram destinados aos impactos socioeconômicos nos municípios afetados.

Figura 14 - Rompimento da barragem de Aznalcóllar na Espanha.



Fonte: Moura *et al* (2020).

✓ Barragem de Mount Polley, Canadá

A barragem de Mount Polley, localizada no Canadá e responsável pela contenção de rejeitos provenientes da extração do ouro e cobre, rompeu em agosto

de 2014, liberando cerca de 24 milhões de metros cúbicos, destruindo grande parte da área florestal próxima e elevando o nível do Lago Polley em cerca de 1,5 m (Marshall, 2017). O material seguiu fluindo e atingiu o Lago Quesnel, gerando uma enorme mancha, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Mancha de rejeitos no Lago Quesnel oriunda do rompimento da barragem de Mount Polley.



Fonte: Moura *et al* (2020).

A causa do rompimento se deu diante de falhas no projeto estrutural, a qual continha uma camada de gelo e argila que não foi identificada pelos projetistas da barragem. Diante de alteamentos realizados na estrutura e lançamentos de rejeitos e água, a camada não identificada rompeu, causando por consequência o rompimento da barragem. Os danos causados foram na contaminação do Lago Quesnel, o qual consistia em um manancial de abastecimento de água e berço de reprodução de salmões vermelhos, prejudicando a atividade da pesca para os pescadores da região.

✓ Barragem B1 da mina do Córrego do Feijão, Minas Gerais

No Brasil, um dos maiores casos de acidentes de barragens recentes ocorreu na barragem B1, localizada em Minas Gerais, na província mineral do Quadrilátero Ferrífero, responsável por conter rejeitos oriundos da exploração do ferro. A

barragem rompeu em janeiro de 2019 na cidade de Brumadinho, liberando cerca de 12 milhões de metros cúbicos e atingindo o rio Paraopeba, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Rompimento da barragem B1 em Brumadinho.



Fonte: Globo G1 (2019).

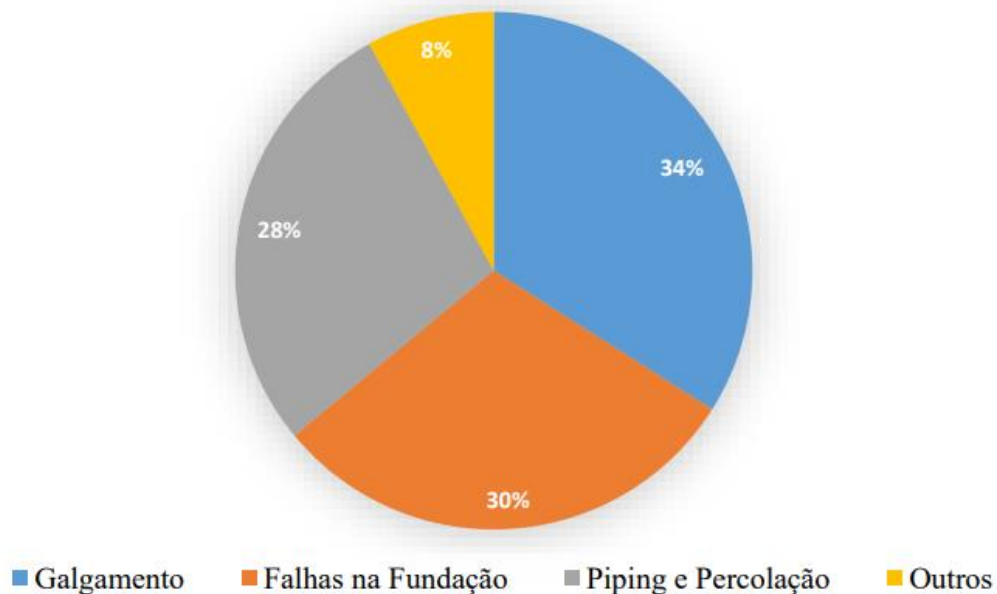
A barragem rompeu devido ao processo de liquefação, atingindo funcionários da Vale S.A, mineradora responsável pela barragem, assim como a população a jusante, resultando em 270 mortes, sendo considerado um dos acidentes mais catastróficos do mundo (Globo G1, 2019).

3.2.2 Causas de rupturas de barragens de rejeitos

No tocante à eventos de rupturas de barragens de rejeitos, ainda que possua baixa probabilidade de ocorrência, é um tema de extrema importância, principalmente por apresentar maior percentual de ruptura em relação a barragens de água (ICOLD, 2001). É possível citar duas origens de causas que levam uma barragem a romper: ocorrência de um fenômeno natural, o qual foi responsável por gerar um abalamento na estrutura e sua consequente ruptura, ou um mal planejamento da barragem. Diante desses fatores, de acordo com Duarte (2008), as barragens exigem cuidados e atenção especiais ao se referir a elaboração do projeto, a operação e manutenção, sobretudo ao seu descomissionamento em caso de necessidade.

Segundo os estudos de ICOLD (1973), para barragens com altura superior a 15 m que romperam no período de 1900 a 1973, as principais causas de ruptura eram galgamento e falhas na fundação, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Causas de rupturas em barragens com altura superior a 15 m entre 1900 e 1973.



Fonte: ICOLD (1973).

Outro estudo relevante da ICOLD (1995) revelou resultados referentes a rompimentos de barragens quanto ao seu tipo de fundação. Os resultados apresentaram que cerca de 70% das rupturas ocorrem em barragens de terra e de enrocamento e cerca de 70% desses acidentes ocorrem na primeira década de vida da barragem, ressaltando que o primeiro enchimento da estrutura corresponde ao período mais crítico.

No ano de 2001, a ICOLD (2001) realizou novos estudos referente à causas de ruptura em barragens e os resultados apresentaram-se coerentes com os resultados obtidos em 1973, ainda conforme a Figura 17.

O galgamento, fenômeno em que ocorre a passagem do fluxo pela crista da barragem, em rupturas de barragens, geralmente, ocorre diante de alguns fatores, como dimensionamento inadequado do sistema extravasor, diminuição da borda livre, uso de materiais inadequados ou ainda a partir de cálculos incorretos de parâmetros geotécnicos.

O fenômeno de *piping*, também denominado erosão interna, é originado a partir do arrastamento de partículas de solo devido à força da percolação da água através da barragem. Essa erosão é iniciada em um ponto de emergência d'água, o qual progride ao longo do tempo carregando junto as partículas de solo, passando a apresentar formato tubular, podendo ser denominado de erosão tubular progressiva.

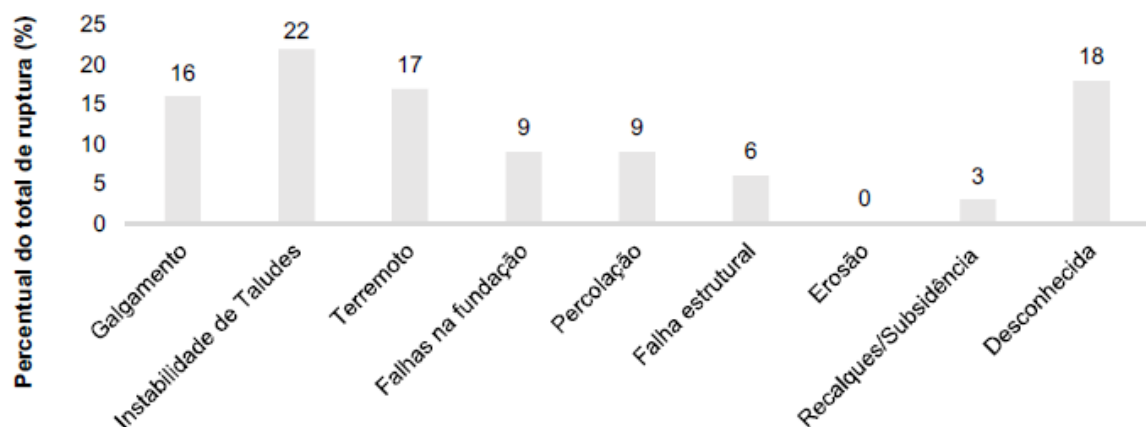
A erosão tubular progressiva sob a fundação da barragem pode gerar

elevação da pressão de percolação, gerando danos no material da fundação e consequentemente colocando em risco a estabilidade da estrutura. Com isso, o eixo do barramento fica comprometido, podendo causar acidentes.

De acordo com o estudo realizado por Mota (2017 *apud* Zhang) em 593 casos de falhas em barragens de terra no tocante ao volume e altura, as barragens com menor capacidade de armazenamento e menor altura apresentaram maiores probabilidades de romperem, estando esse estudo em conformidade com o estudo da ICOLD (1995). Ainda foi observado que a maioria das falhas ocorreram devido a galgamento, ocasionado por insuficiência do vertedouro, e *piping*.

Segundo Blight (2010), a principal causa de rompimentos de barragens é a instabilidade dos taludes, responsável por 22% dos casos de rupturas avaliadas, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Causas de rupturas em barragens de rejeitos.



Fonte: Blight (2010).

3.2.3 Aspectos conceituais

Existem diversas metodologias voltadas para análise de rupturas de barragens de rejeitos, não existindo uma específica para abordagem do problema, pois cada caso possui sua peculiaridade. De maneira geral, essas metodologias são baseadas em estudos e aspectos hidráulicos, geotécnicos e geométricos, as quais consideram que o fluxo proveniente da ruptura de uma barragem de rejeitos pode ser analisado pela análise da propagação de onda de fluidos não-Newtonianos.

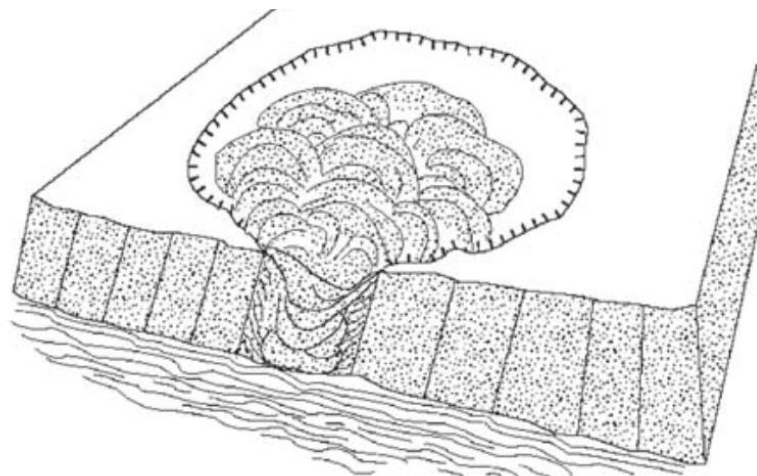
De acordo com Ribeiro (2015), os principais alvos de um estudo de ruptura são a distância atingida pela onda gerada a partir da ruptura, a velocidade de propagação, a profundidade da inundação e o tempo de chegada da onda. Já a análise de rupturas em barragens de rejeitos consiste em uma análise mais complexa em relação a rupturas em barragens de água, devido à necessidade em levar em consideração as propriedades geotécnicas e reológicas do rejeito em estudo, além de considerar os aspectos geométricos do reservatório e do maciço.

3.2.3.1 Aspectos referentes à ruptura, à geometria do reservatório e às condições climáticas

De acordo com Ribeiro (2015), no tocante à ruptura de barragens de água, a curva cota x volume representa bem a geometria do reservatório, pois a água não possui resistência ao fluxo, ou seja, todo o volume de água contido no reservatório é liberado em um evento de ruptura. Ao contrário de barragens de rejeitos, o volume liberado em uma ruptura depende dos aspectos geotécnicos e reológicos do rejeito, devendo esses parâmetros ser considerados na modelagem.

Nesse sentido, Savage *et al.* (2003) realizaram um estudo de ruptura em depósitos de argilas sensíveis (*quick clays*), o qual resultou em um processo de liquefação, uma vez que ao ocorrer uma pequena ruptura, esta acarreta em uma movimentação da massa, gerando fluxo. Os taludes passam a não suportar o fluxo gerado, resultando em um aspecto cicatrizado com uma brecha bem caracterizada, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Morfologia de ruptura regressiva formada em uma ruptura por fluxo.



Fonte: Savage *et al* (2003).

O estudo de Savage *et al.* (2003) é aplicado para estruturas de contenção de rejeitos, visto que tratam-se de materiais suscetíveis a sofrer o processo de liquefação. Um exemplo prático para tal estudo é o rompimento da barragem de Merriespruit na África do Sul, em 1994, o qual apresentou uma geometria da ruptura semelhante a Figura 19. A ruptura da barragem está apresentada na Figura 20.

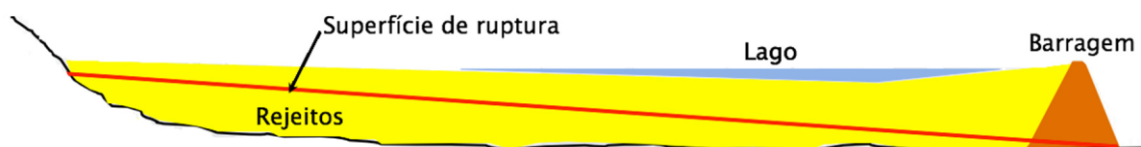
Figura 20 - Ruptura da barragem de Merriespruit – África do Sul.

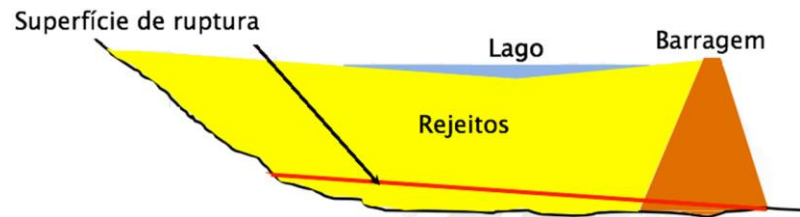


Fonte: Ribeiro (2015) *apud* Tailings.Info (2015).

Em relação à geometria do reservatório, é possível observar a relação entre a altura do maciço e o comprimento da superfície de ruptura dentro do reservatório, parâmetros que podem influenciar na dinâmica do rompimento, pois variam o volume liberado. A Figura 21 apresenta a influência da geometria na ruptura do reservatório.

Figura 21 - Influência da geometria na ruptura do reservatório.

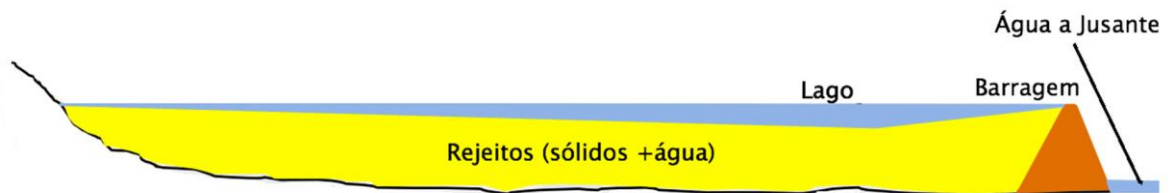




Fonte: Adaptado de Berger (2011).

Por fim, as condições climáticas estão relacionadas às falhas que causam as rupturas de barragens. Portanto, em termos de cenários de ruptura, destaca-se o cenário chuvoso (*rainy day*), correspondente à um período de chuvas intensas, considerando rupturas por galgamento e instabilidade de taludes devido à elevação da superfície freática, e considerando o maior volume de água no reservatório e maior vazão de água no corpo d'água a jusante, conforme a Figura 22.

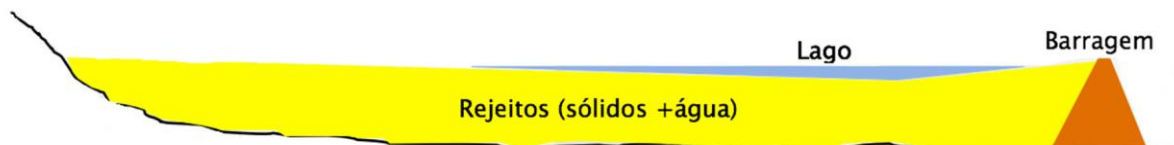
Figura 22 - Condições de contorno no reservatório no período chuvoso.



Fonte: Berger (2011).

O outro cenário a ser considerado é o cenário seco (*sunny day*), correspondente à períodos de estiagem, o qual está associado às rupturas por instabilidade de fundação, *pipping* (erosão interna) e liquefação. Em termos de modelagem, considera-se o volume de água para o nível máximo de operação do lago e fluxo normal no corpo d'água a jusante, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Condições de contorno no reservatório no período seco.



Fonte: Berger (2011).

3.2.3.2 Aspectos hidráulicos referentes ao fluxo do rejeito

Para barragens de água, as análises de ruptura consideram a condição de fluido newtoniano para a água liberada do reservatório, pois, mesmo que exista carreamento de sedimentos, este encontra-se em uma concentração baixa em relação ao volume de água. Entretanto, para barragens de contenção de rejeitos, essa condição não se faz coerente, visto que a concentração de sólidos é bastante elevada, possibilitando o desenvolvimento de uma resistência ao cisalhamento para o material em repouso e uma alta viscosidade plástica no fluxo liberado. Portanto, a condição de fluido Não-newtoniano é a mais condizente para a análise, devendo considerar as características de sedimentação, adensamento e resistência ao cisalhamento do material, assim como a operação do volume de água do lago, sendo esses parâmetros essenciais para a estimativa da concentração de sólidos existentes no fluxo liberado.

Para melhor compreensão, diversos estudos foram elaborados estimando o teor de sólidos em materiais, estando disponíveis na literatura. O'Brien e Julien (1985) realizaram um estudo visando classificar o tipo de escoamento de acordo com o teor de sólidos volumétrico, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação do tipo de escoamento de acordo com o teor de sólidos volumétrico.

Característica do Escoamento	Concentração Volumétrica (Cv)	Descrição
Escorregamento	0,53 a 0,90 0,50 a 0,53	Não há escoamento Deformações internas e movimento lento devido às tensões
Lama plástica	0,48 a 0,53	Escoamento evidente, apesar de lento / Deformações plásticas sem espraçamento sobre as superfícies adjacentes
	0,45 a 0,48	Início de espraçamentos, apesar da atuação de forças coesivas
Corrida de Lama	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
	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: Adaptado de O'Brien e Julien (1985).

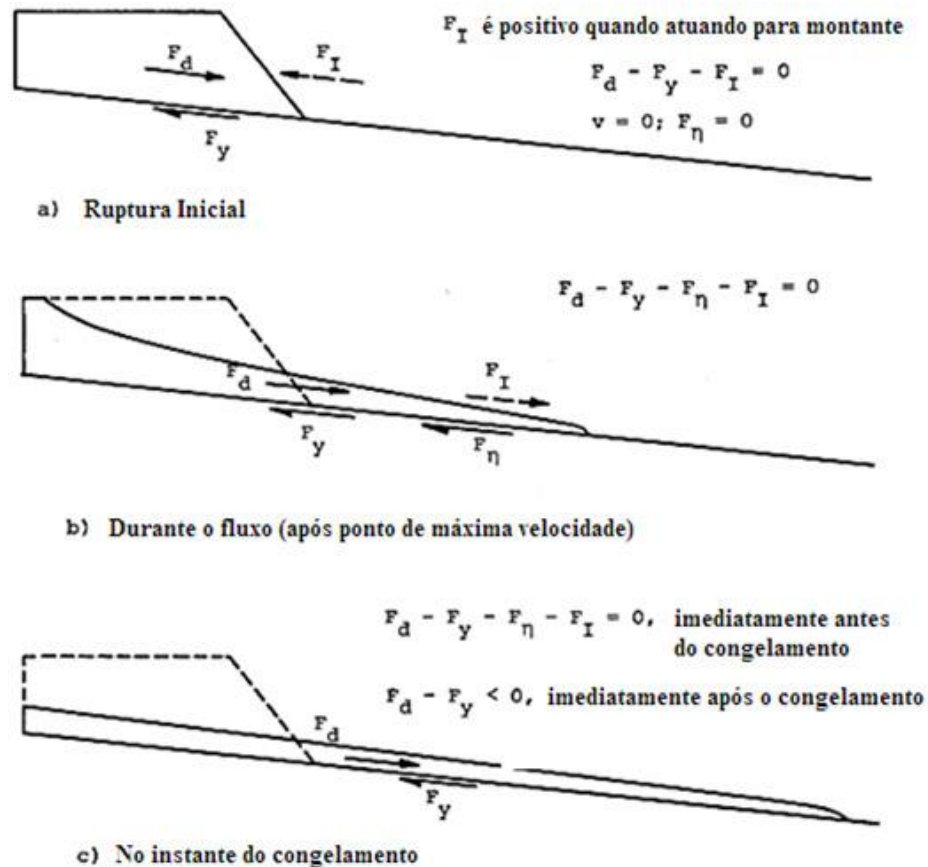
O'Brien e Julien (1988), assim como diversos outros autores, ao realizarem estudos sobre o fluxo liberado, concluíram que a viscosidade e a tensão de escoamento aumentam de maneira exponencial com a concentração de sólidos (Cv).

No tocante ao fluxo dos rejeitos, o estudo realizado por Jeyapalan *et al.* (1983) concluiu que, em relação ao comportamento do fluxo, existem dois tipos de rejeitos, sendo eles os rejeitos de fosfato e os demais rejeitos. Os autores identificaram que os rejeitos de fosfato possuem baixa viscosidade devido as características dos grãos, e por isso o comportamento do fluxo é similar ao comportamento da água. Além disso, também foi observado que os rejeitos de fosfato geram regime turbulento e os demais rejeitos, denominados rejeitos liquefeitos, geram regime laminar. Entretanto, uma revisão do estudo foi realizada, a qual concluiu que a classificação desses dois tipos de rejeitos não é adequada, pois todos os rejeitos podem apresentar regime turbulento no fluxo para valores baixos de concentração volumétrica de sólidos.

3.2.4 Mecânica dos rejeitos

Compreender a mecânica da ruptura de uma barragem de contenção de rejeitos desde o rompimento até o momento em que o fluxo cessa é um fator extremamente importante para posteriormente realizar as análises metodológicas de ruptura. De acordo com Bryant *et al* (1983), existem três fases durante uma ruptura: massa em repouso antes da ruptura, massa durante o fluxo pós rompimento e massa congelada (em repouso após o cessamento do fluxo). Para cada fase, existem forças atuantes, as quais se podem ser visualizadas na Figura 24.

Figura 24 - Fases de uma ruptura por fluxo.



Fonte: Bryant *et al* (1983).

As forças destacadas na Figura 24 correspondem a:

- F_d : Forças atuantes incluindo pressões ativas na carga do fluxo e componente do peso do fluxo;
- F_y : Força de resistência ao fluxo devido à resistência do rejeito, incluindo a resistência estática ao longo da base do deslizamento e a menor capacidade de tração do fluxo;
- F_{η} : Força de viscosidade ao longo da base do fluxo;
- F_I : Força inercial atuante na direção oposta à aceleração da massa, igual ao produto entre a massa do fluxo e sua aceleração.

De maneira geral, as forças estão relacionadas ao equilíbrio dinâmico, conforme a Equação 3.

$$F_d - F_y - F_n - F_I = 0 \quad (3)$$

No tocante à mecânica do fluido, esta inicia-se no momento da ruptura, em que existe um aumento da aceleração do fluxo para jusante até atingir a velocidade máxima. Após ultrapassar esse ponto, o fluxo desacelera tendendo a atingir o equilíbrio estático, em que as forças viscosas (F_n) e forças inerciais (F_I) se anulam.

A seguir, serão apresentadas as propriedades mecânicas dos rejeitos, visando permitir a elaboração de modelos que relacionam a forma e concentração de disposição às propriedades geotécnicas e à reologia do material.

3.2.4.1 Sedimentação, adensamento e ressecamento dos rejeitos

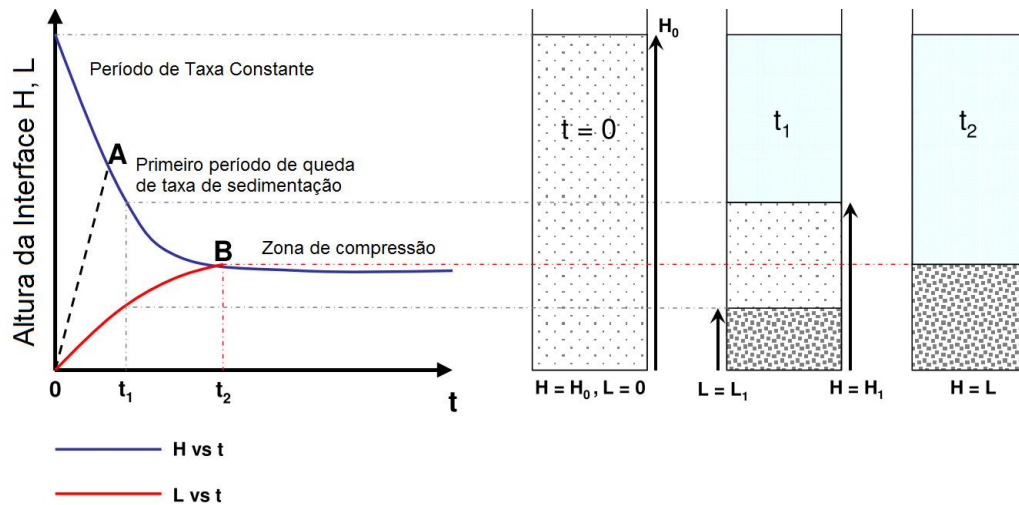
A partir da deposição dos rejeitos no reservatório, estes iniciam o processo de sedimentação e adensamento. Os sólidos podem depositar por sedimentação livre ou sedimentação obstruída, na qual as partículas se movimentam como uma massa.

Quando as partículas entram em contato entre si, passa a existir tensões interparticulares, a polpa se transforma em solo e adere-se o conceito de adensamento por peso próprio. Entretanto, determinar o momento exato em que a polpa se torna uma massa consiste em um fator complicado (Salfate, 2011).

Salfate (2011) afirma que a massa em processo de sedimentação passa por três fases: período de taxa constante, primeiro período de queda de taxa de sedimentação e segundo período de queda de taxa de sedimentação ou zona de compressão. O processo de sedimentação é mostrado na Figura 25, na qual “ h vs t ” (azul) é a superfície superior e o sedimento é representado pela relação “ L vs t ” (vermelho). O autor alega que, no período de taxa constante, ocorre a sedimentação livre das partículas, o qual geralmente ocorre em polpas muito diluídas. Já o primeiro período de queda de taxa de sedimentação é gerado a partir do movimento ascendente da água (ponto A da Figura 25) existente nos poros e o segundo período de queda de taxa de sedimentação ocorre quando a linha do sedimento se encontra com a linha da interface da suspensão (ponto B da Figura 25).

Ressalta-se que, ainda de acordo com Salfate (2011), o período de taxa constante pode não acontecer para rejeitos com alta concentração de sólidos e, para rejeitos com partículas de tamanhos variáveis, pode ocorrer o processo de segregação.

Figura 25 - Curva de sedimentação.



Fonte: Adaptado de Salfate (2011).

De acordo com Kynch (1952), no processo de sedimentação, a velocidade de queda das partículas em suspensão é definida pela densidade da suspensão. É importante ressaltar que a teoria de Kynch (1952) é válida para casos em que os grãos não estejam em contato entre si. A Equação 4 demonstra a solução proposta pelo autor.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V(C) \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$V(C) = \frac{\partial(Vs \cdot C)}{\partial C} \quad (5)$$

Em que,

- C é a massa de partículas por volume unitário (concentração) em g/cm^3 , obtida por $C = (1/1+e) \cdot G_s$;
- G_s é a densidade dos grãos em g/cm^3 ;
- V_s é a velocidade de sedimentação cm/s ;
- e é o índice de vazios.

Gibson *et al.* (1967) apresentaram melhor o processo de adensamento à grandes deformações, conforme apresentado na Equação 6.

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k}{\gamma_w(1+e)} \frac{de}{dz} \right] + \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left(\frac{k}{1+e} \right) \frac{\partial e}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Em que,

- e corresponde ao índice de vazios;
- k é o coeficiente de permeabilidade em cm/s;
- σ é a tensão efetiva vertical em Pa;
- Z corresponde a coordenada lagrangeana reduzida;
- γ_w é a massa específica da água em g/cm³;
- γ_s é a massa específica dos grãos em g/cm³.

Para a solução da Equação 6, torna-se necessário o entendimento da lei de compressibilidade, a qual Liu e Znidarcic (1991) elaboraram a Equação 7.

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (7)$$

Em que,

- e corresponde ao índice de vazios;
- σ' é a tensão efetiva vertical em Pa;
- A , B e Z correspondem a coeficientes empíricos extraídos de ensaios de laboratório de adensamento à grandes deformações, em que Z possui a mesma unidade da tensão efetiva, A tem unidade inversa a Z e B é adimensional.

Além de compreender a lei de compressibilidade para a solução da Equação 7, essa compreensão também se faz necessária para a lei de permeabilidade, a qual Somogy (1979) desenvolveu a Equação 8.

$$k_{sat} = C e^D \quad (8)$$

Em que,

- k_{sat} é o coeficiente de permeabilidade do solo saturado em cm/s;

- e corresponde ao índice de vazios;
- C e D correspondem a coeficientes empíricos extraídos de ensaios de laboratório, em que C tem a mesma unidade de k_{sat} e D é adimensional.

No tocante ao ressecamento, esse processo inicia-se ao final da disposição dos rejeitos, em que a camada superficial do solo começa a perder umidade e o limite de contração é alcançado. A partir disso, trincas são formadas no rejeito, as quais podem atingir metros de profundidade.

Alguns aspectos influenciam diretamente nos processos de sedimentação, adensamento e ressecamento, como o tipo de rejeito, o clima do local, as estratégias de recuperação da água, o método de disposição do rejeito, as condições da fundação, sendo o tipo de rejeito o aspecto mais importante devido a alteração das características de interação das partículas com a água através do tipo de granulometria.

3.2.4.2 Liquefação dos rejeitos

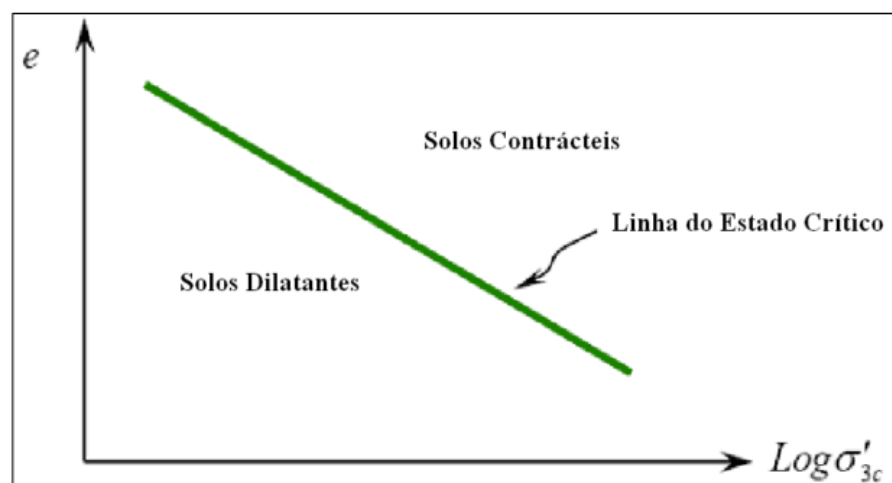
3.2.4.2.1 Conceitos básicos

O processo de liquefação ocorre devido a redução da resistência efetiva do solo causada por ações externas, chamadas de forças cíclicas ou monotônicas, como alta pressão externa aplicada aos rejeitos, seja através de carregamentos, disposição do próprio rejeito, terremotos. Em geral, esse fenômeno ocorre em depósitos susceptíveis de materiais saturados, os quais, ao serem submetidos a tensões cisalhantes, tendem a contrair o volume. Como os poros encontram-se preenchidos por água, reduzindo a permeabilidade, e o tempo de drenagem é superior ao tempo de aplicação do carregamento, a contração de volume na condição não-drenada implica em um aumento da poropressão. Conforme o carregamento ocorre, em determinado momento a poropressão se iguala a tensão efetiva, fazendo com que as partículas percam o contato entre si, ou seja, o material perde sua resistência ao cisalhamento, passando a se comportar como um líquido viscoso.

O conceito de liquefação está relacionado ao conceito de índice de vazios crítico, o qual permitiu o desenvolvimento da teoria dos estados críticos. Essa teoria é base para o entendimento do fenômeno de liquefação em rejeitos.

Casagrande (1975) descobriu, em seus estudos de tendência à mudança de volume durante o cisalhamento, que o solo arenoso podia sofrer certas deformações sem causar alteração em seu volume. Esse entendimento era denominado índice de vazios crítico, correspondendo a um estado crítico. O autor percebeu a relação entre os valores de índices de vazios críticos com os logaritmos das tensões efetivas confinantes e desenvolveu a linha do estado crítico, a qual distingue solos granulares dilatantes e solos granulares contrácteis, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Linha de estado crítico.



Fonte: Freire-Neto (2009).

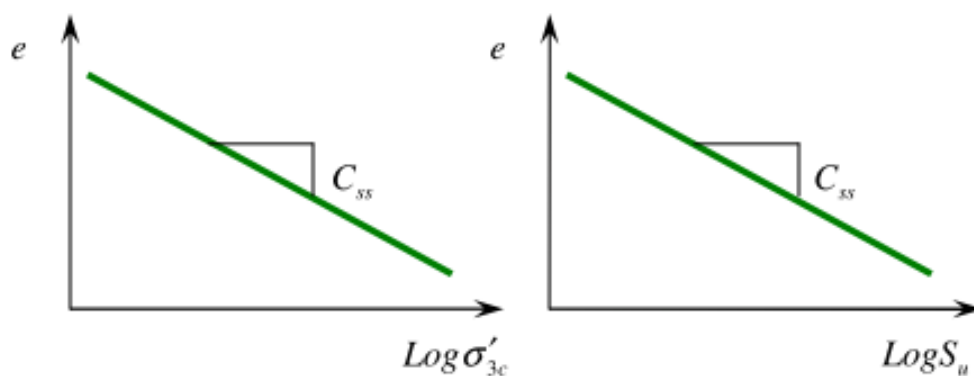
Posteriormente, Castro (1969) elaborou diversos ensaios de compressão triaxial não drenados com tensão controlada, relacionando a tensão confinante efetiva e o índice de vazios para grandes deformações. Com isso, o autor desenvolveu a linha de estado permanente, o qual define que uma massa de partículas deforma continuamente com volume, tensão efetiva normal, tensão cisalhante e velocidade constantes. Após diversos estudos realizados, pode-se afirmar que ambas as linhas são similares.

Castro (1969) estudou três tipos de comportamentos em solos através de ensaios triaxiais não drenados. Para solos fofos, observou-se pico de resistência não drenada para baixos níveis de deformação e rápido colapso, sendo denominado como processo de liquefação para alguns autores e, posteriormente, como liquefação verdadeira para outros. Já para solos densos, foi identificado contração de volume inicial e em seguida expansão volumétrica sob tensões de confinamento altas, alcançando valores altos de resistência ao cisalhamento. Por fim, para solos

com densidade relativa intermediária, foi observado o chamado ponto de transformação de fase, em que o pico de resistência identificado no início do ensaio foi seguido por uma região de amolecimento e só terminou quando iniciou uma expansão volumétrica novamente. Além disso, mesmo com carregamentos subsequentes adicionais, tal solo continuou dilatando sob altas tensões de confinamento e altos valores de resistência ao cisalhamento, caracterizando o processo de liquefação limitada.

Para melhor entendimento do processo de liquefação, a proporcionalidade entre a linha de estado permanente e a linha de consolidação é um elemento essencial (Figura 27), o qual possibilitou o desenvolvimento de diversas metodologias de análise de susceptibilidade à liquefação. Essa proporcionalidade foi observada a partir da proporcionalidade entre a resistência não drenada na condição permanente e a tensão efetiva de confinamento na condição permanente, a qual caracterizou o paralelismo entre duas relações: a relação entre o índice de vazios e a resistência não drenada do solo (linha do estado permanente) e a relação entre o índice de vazios e a tensão confinante efetiva (linha de consolidação) na escala logarítmica.

Figura 27 - Proporcionalidade entre a linha SSL (linha de estado permanente ou steady state line) baseada em resistência não drenada e a linha SSL baseada em tensão efetiva de confinamento em escala logarítmica.



Fonte: Guillén (2004).

A linha SSL pode ser utilizada para compreender a susceptibilidade à liquefação de um determinado solo a partir das condições que este se encontra. Sendo assim, um solo com seu estado encontrado abaixo da linha SSL não é susceptível à liquefação, entretanto, um solo com seu estado encontrado acima da SSL, este pode ser susceptível à liquefação quando as tensões cisalhantes

necessárias para o equilíbrio estático ultrapassarem a resistência ao cisalhamento.

3.2.4.2.2 Susceptibilidade à liquefação

Acreditava-se que o processo de liquefação ocorria apenas em depósitos de areia, entretanto, estudos foram realizados em siltes não plásticos e em pedregulhos e os mesmos apresentaram ocorrência desse fenômeno. Sendo assim, a distribuição granulométrica e o formato dos grãos influenciam no potencial a liquefação dos solos e, ainda, a quantidade de partículas finas ($\% > \#200$) não é o fator que melhor indica a susceptibilidade à liquefação, e sim a quantidade de argilo-minerais presente.

Estudos realizados por Carraro *et al.* (2003) em areias puras e areias siltosas apontam que o melhor indicador de susceptibilidade à liquefação é o índice de plasticidade (IP). Nesse sentido, outros autores realizaram pesquisas em sequência, como Boulanger e Idriss (2004, 2006), os quais diferenciaram o comportamento dos solos em areia ("*sand-like material*") e em argila ("*clay-like material*") através do índice de plasticidade (IP). Em resumo, para tais autores, solos com IP superior a 7% não são suscetíveis à liquefação, pois estes apresentam comportamento argiloso.

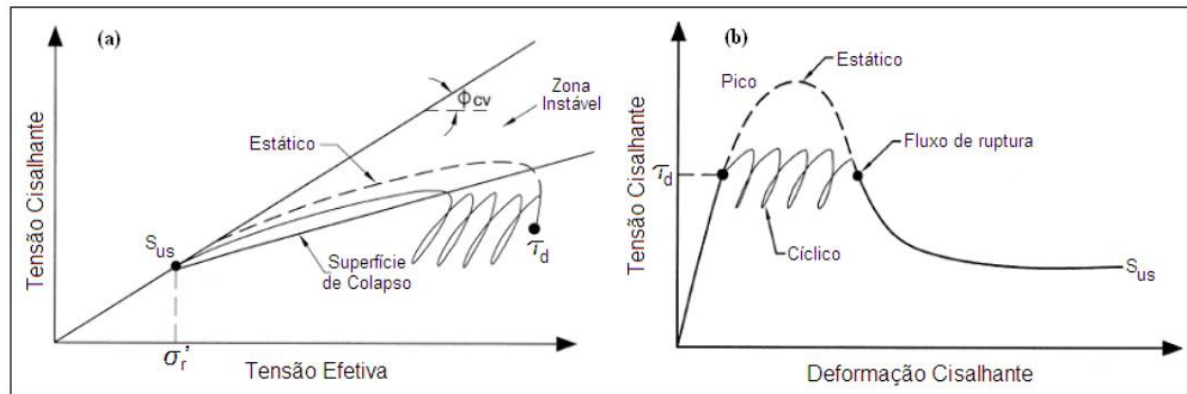
Vários outros pesquisadores desenvolveram faixas granulométricas de solos susceptíveis à liquefação e, diante disso, conforme Terzaghi *et al* (1996), os rejeitos de mineração consistem em materiais susceptíveis a sofrer tal fenômeno, mesmo apresentando alta quantidade de partículas com tamanhos de frações de silte e argila, pois estes finos são compostos de sólidos não plásticos. Isso acontece devido ao fato dos finos existentes nos rejeitos reduzirem a permeabilidade do material, elevando a susceptibilidade à liquefação.

Apesar de um material ser susceptível a liquefação, não necessariamente esse processo ocorre. É necessário existir condições que desencadeiem na ocorrência do fenômeno. Esse gatilho pode ser dado através de carregamentos estáticos ou dinâmicos, em que o carregamento estático ocorre quando a carga é aumentada e os deslocamentos ocorrem em uma única direção, e o carregamento dinâmico gera tensões cisalhantes reversas, as quais podem induzir uma contração e elevar as poropressões.

Stark *et al.* (1998) desenvolveram os gráficos referentes à liquefação estática e dinâmica através de um ensaio em areia saturada. Para a Figura 28 (a), observa-

se as trajetórias de tensões efetivas na areia saturada a partir de carregamentos cíclicos e estáticos não drenados e na Figura 28 (b) observa-se o comportamento tensão-deformação dos carregamentos.

Figura 28 - Desencadeamento de liquefação estática e dinâmica.

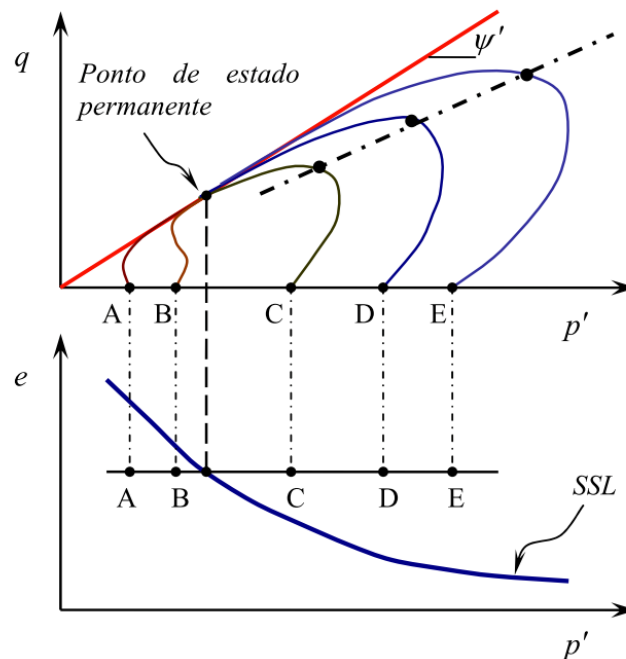


Fonte: Stark et al. (1998).

É possível perceber que o fenômeno de liquefação ocorre no momento em que as tensões atuantes encontram a superfície de colapso e, conforme deformações cisalhantes, a resistência do solo reduz até o valor no estado permanente. Além disso, as tensões cisalhantes gatilho da liquefação consistem em tensões maiores que as tensões no estado permanente alcançadas pós fenômeno, enfatizando a importância da obtenção da resistência de pico e da resistência no estado permanente.

Guillén (2004) estudou a resistência de estado permanente através de cinco amostras de mesmo índice de vazios, as quais foram submetidas a carregamentos não drenados monotônicos sob tensões confinantes distintas, conforme apresentado na Figura 29. Através do experimento, o autor concluiu que a resistência de estado permanente era a mesma para todas as amostras quando submetidas a carregamentos não drenados, não importando o estado de tensões inicial. Isso acontece devido ao fato de todas as amostras possuírem o mesmo índice de vazios após o processo de adensamento. Conforme demonstrado na Figura 29, é notório que apenas os solos C, D e E tendem a contrair e gerar poropressão positiva, sofrendo assim, o fenômeno da liquefação.

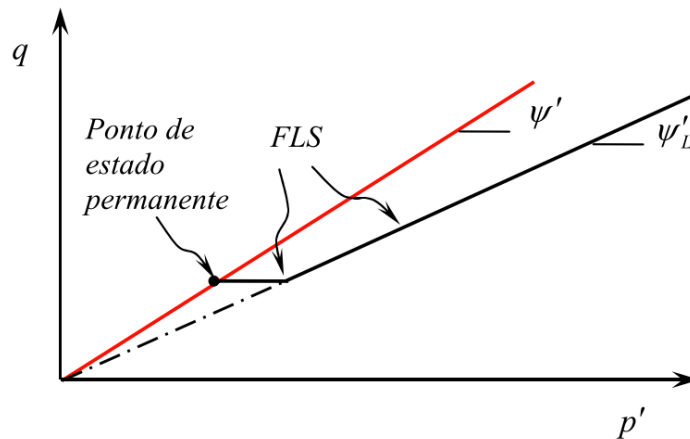
Figura 29 - Trajetória de tensões para amostras sob mesmo índice de vazios.



Fonte: Guillén (2004).

Ainda de acordo com Guillén (2004), o estado de tensões confinantes efetivo de consolidação do solo é fator importante para a tensão cisalhante desenvolvida no material, conforme pode ser observado na Figura 30. Além disso, na mesma figura, a reta formada pela junção dos pontos de máxima deformação cisalhante nas amostras C, D e E é denominada como superfície de fluxo por liquefação (FLS – “*Flow liquefaction surface*”). A partir dessa reta, pode-se observar que, como o fenômeno da liquefação não ocorre para tensões cisalhantes abaixo do estado permanente, então a reta FLS é interceptada no ponto de estado permanente, caracterizando um limite entre estados estáveis e instáveis de materiais, conforme a Figura 30.

Figura 30 - Superfície de fluxo por liquefação.



Fonte: Guillén (2004).

Conforme exposto por Guillén (2004) na figura acima, o processo de liquefação é iniciado em um solo se, em determinado momento, um elemento do solo atingir a superfície FLS sob condição não drenada. Além disso, o autor afirma ainda a existência de duas fases no processo, sendo a primeira fase caracterizada por baixas deformações e geração de poropressão gatilho para atingir a FLS. Já na segunda fase, na qual as tensões cisalhantes trabalham para estabilizar o solo, ocorre um fenômeno denominado de amolecimento (*"strain softening"*), poropressão adicional e geração de grandes deformações, migrando a trajetória de tensões efetivas da FLS para a SSL.

3.2.4.3 Reologia dos rejeitos

A reologia consiste em uma ciência que analisa o comportamento da matéria, como ela se deforma e escoar quando submetida a esforços externos. Nesse sentido, no tocante a reologia dos sólidos, o principal parâmetro é a deformação elástica, já para a reologia dos fluidos, o parâmetro de maior interesse é a viscosidade, a qual consiste na propriedade reológica de um fluido que indica a facilidade de escoamento contínuo dada uma tensão de cisalhamento externa.

De acordo com Barnes (1989), a classificação de determinados materiais como sólido ou fluido não é uma tarefa fácil. Isso porque é possível observar sólidos se comportando como líquidos e vice-versa quando submetidos a um amplo intervalo de tensões e tempo.

Em termos de escoamento, um fator importante é a existência de um limite de

escoamento. De acordo com Bingham (1922), existe um valor residual para a tensão de cisalhamento que, ao ser superado, inicia-se o fluxo e comportamento viscoso do material, chamado de viscoplasticidade. Esse modelo de comportamento define o comportamento dos solos sobre um estado permanente de tensão.

Portanto, ao considerar que corridas de massa são caracterizadas por movimentos rápidos, nos quais os materiais possuem comportamento de fluidos viscosos, os solos seriam classificados como fluidos viscoplásticos durante esse processo, necessitando de estudo baseado na reologia para melhor compreensão.

Nesse sentido, pode-se concluir que o estudo das propriedades reológicas dos rejeitos é de extrema importância para a elaboração de estudos de análises de rupturas de estruturas de contenção desses materiais, pois esse processo pode ser entendido como movimento de corridas de massa (*“Flow Failure”*).

3.2.4.3.1 Lei da viscosidade de Newton

Isaac Newton, em 1687, estudou o escoamento em fluidos através de experimentos, o qual, posteriormente, subsidiou o conceito de viscosidade. O estudo experimental de Newton consistiu na aplicação de uma força em uma placa com determinada área, separada de outra placa por uma certa distância. A partir disso, o autor definiu a tensão de cisalhamento como sendo a força necessária por unidade de área para manter uma diferença de velocidade entre as placas. Posteriormente, Isaac Newton definiu a taxa de cisalhamento como sendo a diferença das velocidades entre duas partículas vizinhas pela distância entre elas, e, ainda afirmou que, a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, em que a constante de proporcionalidade consiste na viscosidade do fluido, conforme a Equação 9.

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) = \mu \dot{\gamma} \quad (9)$$

Onde,

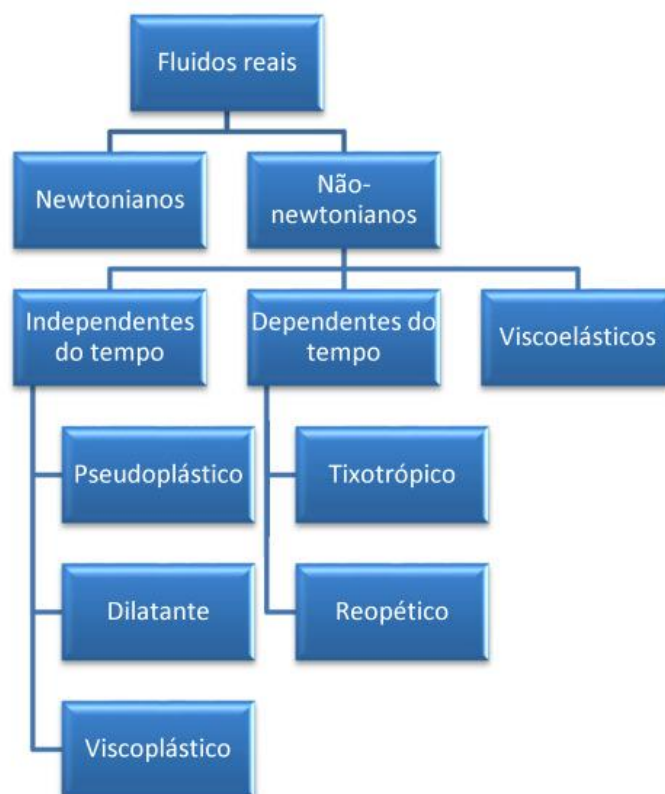
- τ é a tensão de cisalhamento em Pa;
- μ é a viscosidade do fluido ou coeficiente de proporcionalidade em m²/s;
- $\left(\frac{dv}{dy} \right)$ é o gradiente de velocidade;

Portanto, a viscosidade consiste na principal propriedade reológica de um fluido que indica a facilidade de escoamento contínuo a partir de uma aplicação de tensão de cisalhamento externa. Essa propriedade depende da temperatura, pressão, taxa de cisalhamento, natureza físico-química, campo elétrico e tempo de cisalhamento.

3.2.4.3.2 Fluidos newtonianos e não-newtonianos

Os fluidos podem ser classificados de acordo com suas propriedades reológicas, ou seja, como fluidos ideais e reais. Dentre os reais, estes podem ser classificados como Newtonianos e não-Newtonianos, os quais, este último, são divididos em três classes, conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Classificação dos fluidos reais.



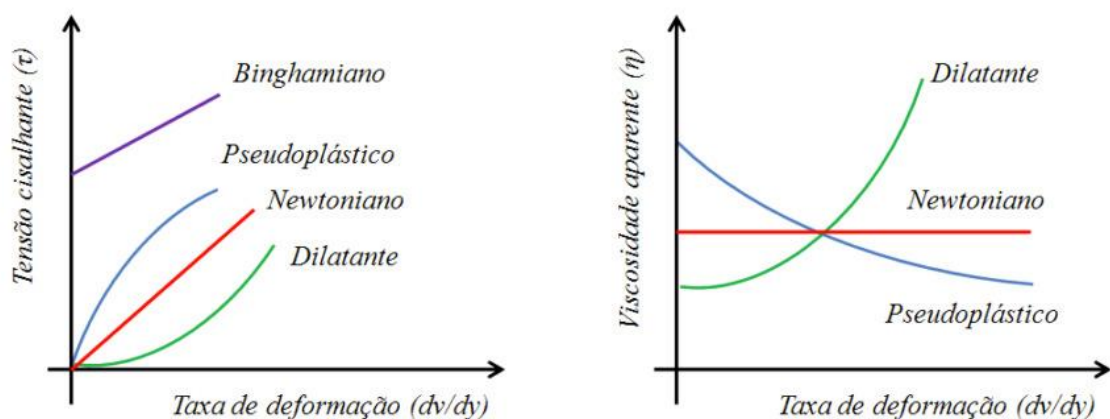
Fonte: Galindo (2013).

De acordo com Tanner (1988), os fluidos Newtonianos apresentam um comportamento reológico conforme a lei de viscosidade de Newton, o qual apresenta relação linear entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento, onde a

viscosidade consiste no coeficiente de proporcionalidade, não apresentando tensão cisalhante de escoamento. Essa viscosidade, nos fluidos Newtonianos, é constante e só é afetada por alterações dos fatores físico-químicos, temperatura e pressão, não sendo influenciada pela tensão e taxa de cisalhamento. Para esse tipo de fluido, a determinação de apenas um parâmetro reológico define seu comportamento reológico.

Os fluidos não-Newtonianos apresentam uma relação não linear entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento, a qual é alterada ao longo do tempo quando submetido a taxa constante de cisalhamento. Além disso, são caracterizados pela dependência da tensão cisalhante em relação à taxa de cisalhamento. Esses fluidos são divididos em três tipos: os dependentes do tempo, os quais possuem sua viscosidade afetada pela taxa e tempo de cisalhamento, e são subdivididos em tixotrópicos e reopéticos, em que os tixotrópicos apresentam um aumento na tensão de cisalhamento quando a taxa de cisalhamento é constante enquanto que nos reopéticos ocorre o processo inverso; os independentes do tempo, os quais têm a viscosidade afetada apenas pela taxa de cisalhamento e são subdivididos em pseudoplásticos, dilatantes e viscoplásticos ou binghamianos (Figura 32); e os viscoelásticos, que apresentam características de sólidos e líquidos, além de apresentar recuperação elástica parcial após sofrer uma deformação (Galindo, 2013).

Figura 32 - Comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo.



Fonte: Nascimento (2008).

No tocante a cada grupo, os fluidos pseudoplásticos apresentam uma

redução na viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento e isso ocorre devido a uma alteração na estrutura, em que os grãos tendem a se alinhar, causando uma redução na resistência ao escoamento e caracterizando uma ausência de tensão de escoamento. Já os fluidos dilatantes consistem em um conceito oposto, em que ocorre um aumento na viscosidade aparente quando aumenta-se a taxa de cisalhamento e isso acontece devido a existência de partículas irregulares que não caracterizam o processo de alinhamento de grãos, sendo bastante comum em suspensões de elevada concentração.

O grupo dos viscoplásticos ou binghamianos são caracterizados por possuir comportamento de corpo rígido até uma máxima tensão cisalhante, entretanto, quando essa tensão é superada, esses fluidos passam a ter viscosidade plástica constante. Isso ocorre em materiais capazes de formar uma espécie de rede articulada, na qual as partículas se ligam em repouso, não permitindo movimentação entre si e apresentando uma solidez e elevada viscosidade, típico de algumas dispersões. A partir do instante em que as forças externas superam essa força existente nas ligações entre partículas, a estrutura colapsa e o material sólido passa a comportar-se como um líquido.

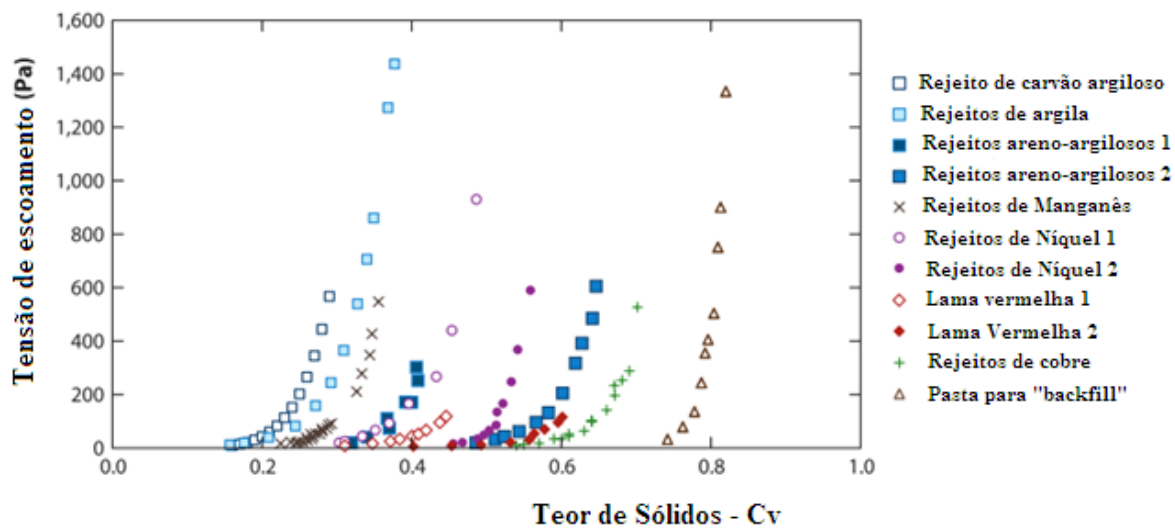
3.2.4.3.3 Reologia dos rejeitos

No tocante a reologia dos rejeitos, a viscosidade e a tensão de escoamento consistem nos principais parâmetros reológicos para o estudo do comportamento reológico do material. Para a obtenção, são realizados experimentos em laboratórios e técnicas experimentais, como a reometria e viscosimetria.

A viscosimetria consiste em uma técnica voltada para obtenção da resistência ao fluxo, utilizando o equipamento denominado viscosímetro. Já a reometria mede as taxas de cisalhamento do material, fazendo uso dos reômetros.

De acordo com Boger (2013), cada rejeito possui uma relação reológica particular, a qual depende das características físicas e químicas do material, conforme pode ser visualizado na Figura 33. Diante disso, a determinação de mais de um parâmetro reológico para compreensão do comportamento reológico do material para fluidos não-Newtonianos é essencial nos estudos de ruptura hipotética.

Figura 33 - Tensão de escoamento vs concentração gravimétrica para diversos tipos de rejeitos.



Fonte: Adaptado de Boger (2013).

3.3 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Os fenômenos naturais, tais como deslizamentos, eventos de chuvas intensas, terremotos, assim como o desgaste ao longo do tempo consistem em fatores que podem afetar a segurança de uma barragem. Diante disso, seu monitoramento constante, através de instrumentação e inspeções regulares, possibilita um maior controle acerca do desempenho da estrutura e identificação de aspectos irregulares causadores de falhas.

Os diversos episódios de acidentes mundiais de barragens e a necessidade de padronizar procedimentos de regulamentação e controle perante os componentes das barragens, serviram de motivação para o desenvolvimento de leis e normas voltadas para a segurança dessas estruturas, estabelecendo medidas como inspeções regulares, reparos e manutenção nas estruturas, assim como elaboração de planos de ações emergenciais.

3.3.1 Legislação internacional de segurança de barragens

A responsabilidade de garantir a segurança da barragem e elaborar o plano de ações emergenciais é do responsável pela estrutura, seja o Estado, empresa privada ou agência governamental, entretanto, no tocante à fiscalização, esta função

recorre às autoridades.

A ICOLD consiste em uma organização não governamental internacional responsável pela política de desenvolvimento tecnológico acerca de segurança de barragens, a qual desde os anos 70 iniciou os investimentos em um programa de segurança de barragens a nível mundial.

Além da ICOLD, existem outras organizações que realizam uma política voltada para a segurança de barragens, como a União Européia (UE), Banco Mundial e Comissão Mundial de Barragens (CMB). Essas organizações podem servir de referência para países que não possuem legislação ou qualquer tipo de norma e regulamentação acerca da segurança de barragens.

De acordo com Veról (2010), o Canadá apresenta uma boa experiência acerca da segurança de barragens, pois das dez províncias do país, quatro possuem legislação própria e as demais utilizam a Associação Canadense de Barragens para dar apoio à suas regulamentações.

Outro país que apresenta boa experiência em relação à segurança de barragens são os Estados Unidos, possuindo leis federais e estaduais. O país tem a função, em muitos estados, de supervisionar todas as barragens existentes em seu território devido a responsabilidade que o governo federal americano tem em coordenar as atividades federais, estaduais e locais. O principal programa que constitui a base da legislação federal americana é o Programa Nacional de Segurança de Barragens (*National Dam Safety Program Act – NDSPA*), aprovado em 1978 e revisado em 1986, o qual estabelece a Comissão Nacional de Revisão de Segurança de Barragens (*National Review Dam Safety Board – NRDSB*) e o Comitê Intergovernamental de Segurança de Barragens (*Interagency Committee on Dam Safety – ICODS*).

O Comitê Intergovernamental de Segurança de Barragens (*Interagency Committee on Dam Safety – ICODS*) elaborou a Guia Federal para a Segurança de Barragens (*Federal Guidelines for Dam Safety*), documento que determina e orienta os procedimentos que devem ser adotados pelos órgãos federais acerca de projetos, planejamento, construção, operação e manutenção das barragens.

3.3.2 Legislação brasileira de segurança de barragens

No Brasil, a Lei nº 12.334 (Brasil, 2010), de setembro de 2010, estabelece a

Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas ao acúmulo de água para diversos usos, à disposição temporária ou final de rejeitos e ao acúmulo de rejeitos industriais, e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Essa lei foi alterada pela Lei nº 14.066 (Brasil, 2020), de setembro de 2020, estabelecendo padrões de segurança de barragens a serem seguidos, visando reduzir a ocorrência de acidentes e determinar medidas a serem tomadas.

Em 2017, foi criada a NBR 13.028 (ABNT, 2017), a qual especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, visando minimizar impactos ao meio ambiente.

Posteriormente, a Lei nº 14.066 (Brasil, 2020) foi criada em 2020, como revisão da Lei nº 12.334 (Brasil, 2010), de setembro de 2010, a qual define características que classificam uma estrutura como barragem: estruturas com altura do maciço igual ou maior a 15 metros, categoria de dano potencial associado médio ou alto e categoria de risco alto. Além disso, essa lei define conceitos importantes acerca da segurança de barragens, visa garantir a observância de padrões de segurança, define procedimentos emergenciais, entre outras diretrizes.

Um ponto relevante sobre a Lei nº 14.066 (Brasil, 2020) é a definição do Plano de Segurança da Barragem (PSB), o qual inclui o Plano de Ações Emergenciais (PAE), da obrigação da elaboração de relatórios de inspeções de segurança regular e especial, mapa de inundação, identificação e avaliação dos riscos, entre outras diretrizes. Outro ponto importante é a proibição de construções de barragens pelo método construtivo de alçamento a montante e a exigência da descaracterização das barragens existentes e construídas através desse método.

A Resolução nº 95 (ANM, 2022), de 7 de fevereiro de 2022, consiste em uma normativa importante acerca de segurança de barragens de mineração, consolidando atos normativos e estabelecendo medidas regulatórias aplicáveis em projetos de barragens de mineração. A Resolução nº 130 (ANM, 2023), de fevereiro de 2023, altera a Resolução nº 95 (ANM, 2022), de 7 de fevereiro de 2022.

É importante ressaltar que o Brasil, a partir de 2010, passou a elaborar legislações acerca de segurança de barragens, e atualmente possui legislação própria, caracterizando uma fase de evolução do país acerca da mineração. Entretanto, antes, o país utilizava o “Manual de Segurança e Inspeção de Barragens” para o direcionamento de trabalhos, confeccionado pelo Comitê Brasileiro de Barragens através do “Guia Básico de Segurança e Barragens” (CBGB,

1999). O manual visa orientar os procedimentos a serem adotados na construção de novas barragens e manter as barragens existentes em um estado seguro.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

O presente item apresenta os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho, os quais consistem em área de estudo, dados de entrada necessários na modelagem e os softwares utilizados.

4.1.1 Área de estudo

Para o estudo desta dissertação, foi utilizado um reservatório de armazenamento de rejeitos. Devido a motivos de sigilo por parte da mineradora, a localização e maiores detalhes acerca da estrutura não serão apresentados. Diante disso, o reservatório será nomeado nesta pesquisa como “reservatório de estudo”.

4.1.2 Dados de entrada

Para obtenção de alguns dados de entrada necessários para a elaboração do estudo de ruptura do reservatório de estudo, contou-se com a contribuição da mineradora. Portanto, por se tratar de informações sigilosas, a seguir será apresentada uma lista contendo, de forma geral, os dados disponibilizados e utilizados.

- Base topográfica do terreno;
- Modelo Digital do Terreno (MDT);
- Dados de precipitação;
- Estudos reológicos do rejeito.

Além destes, o hidrograma de ruptura, obtido no estudo de trânsito de cheias, também consiste em um dado de entrada necessário para o estudo de ruptura hipotética do reservatório de análise.

No tocante ao trânsito de cheias, os dados de entrada utilizados estão apresentados no item 4.2.1.1.1 devido ao nível de detalhamento necessário para desenvolver o estudo.

4.1.3 Softwares

Alinhado com o objetivo deste trabalho, o qual está descrito no item 2, o estudo de ruptura hipotética do reservatório de análise englobou a utilização de dois softwares de abordagem hidráulica visando a comparação dos resultados, são eles: HEC-RAS 2D e RiverFlow2D. Além destes, foi necessário a utilização de um terceiro software, o HEC-HMS, o qual atuou na caracterização hidrológica da região, abordagem necessária para posterior simulação da ruptura nos softwares mencionados, e ainda o QGIS, software que possibilitou a elaboração dos mapas representativos.

4.1.3.1 Modelo HEC-HMS - abordagem hidrológica

De acordo com USACE (1989), o HEC-HMS foi criado pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e consiste em um *software* específico para simulações hidrológicas em bacias hidrográficas, contendo todos os processos do ciclo hidrológico. De forma geral, o programa atua realizando o processo de transformação de chuva em vazão, visando obter resultados do efeito da chuva em determinada área de estudo, utilizando características físicas e de precipitação da bacia. Sendo assim, é possível utilizar o software para diversas finalidades, como elaboração de projetos de drenagem superficial, estudo de trânsito de cheias em reservatórios, estimar perdas de precipitação (infiltração) e escoamento superficial, e, elaborar estudos de ruptura hipotética de barragens, finalidade alvo dessa pesquisa. Para isso, o objetivo do estudo define como se dará a representação da bacia e dos parâmetros necessários como dado de entrada no programa.

Conforme o manual do usuário, o *software* possui quatro fases de operação, sendo estas: perdas (*loss*), transformação (*transform*), fluxo de base (*baseflow*) e roteamento (*routing*). A fase de perdas calcula as perdas, obtendo a precipitação efetiva a partir do método de perdas definido, ou seja, a parcela que de fato escoar superficialmente; a fase de transformação obtém o hidrograma unitário; a etapa de fluxo de base considera um escoamento de base, caso exista; e a fase de roteamento calcula a evolução do hidrograma no rio.

O programa ainda permite a subdivisão da bacia hidrográfica em sub-bacias

menores e realiza o cálculo das vazões para cada uma, considerando o somatório das vazões geradas à montante com as vazões produzidas, obtendo um resultado final. De forma geral, os componentes disponibilizados pelo programa são: modelo de bacia (*basin model*), no qual serão inseridos os parâmetros físicos da bacia; a série de dados de precipitação (*time series data*), onde é inserido os dados de precipitação da região (volume de precipitação) advindos de um pluviômetro, pluviógrafo ou até mesmo dados de precipitações teóricas, como as curvas IDF (intensidade-duração-frequência); modelo meteorológico (*meteorological model*), o qual define as áreas de influência para calcular a precipitação; e as especificações de controle (*control specifications*), no qual é especificado o tempo de interesse para a simulação.

O software HEC-HMS foi utilizado na primeira etapa do estudo, com o auxílio da ferramenta de *dam break* e finalidade de obtenção do hidrograma de ruptura. A partir dessa etapa e após obter o hidrograma de ruptura, foi possível realizar as simulações de ruptura nos softwares de abordagem hidráulica: HEC-RAS 2D e RiverFlow2D.

4.1.3.2 Modelo HEC-RAS 2D - abordagem hidráulica

O HEC-RAS 2D consiste em um modelo hidráulico desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center (HEC)* do *U. S. Army Corps of Engineers (USACE)*, de livre acesso. Esse software permite abordagens e análises unidimensionais e bidimensionais, sendo bastante utilizado para aplicação do fenômeno de ruptura de barragens, utilizando escoamento de fluidos Newtonianos, e recentemente, na versão 6.2, foram adotadas ferramentas para aplicação de escoamento de fluidos não-Newtonianos, utilizada para o presente estudo.

O software HEC-RAS 2D possui interface com a plataforma GIS, possibilitando a elaboração dos mapas de inundação e permitindo obtenção de elevações do rejeito, volume e velocidade do fluxo e profundidade. A extração dos mapas em formato raster e importação para o software QGIS permite a elaboração e personalização dos mapas finais, os quais servirão para apresentação dos resultados.

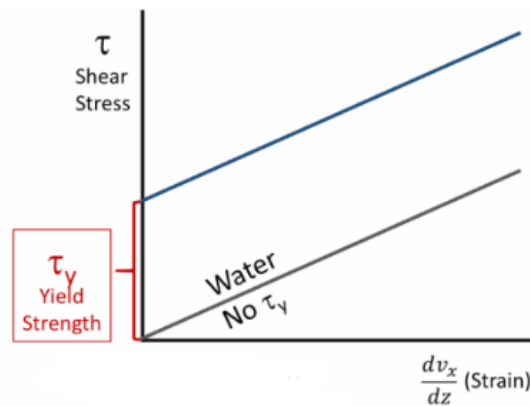
Para o presente trabalho, foi realizada a análise bidimensional no HEC-RAS 2D, considerando regime não permanente. De forma geral, a metodologia baseou-se

na inserção do Modelo Digital do Terreno (MDT), no processamento dos dados geométricos, com detalhamento da malha, definição das condições de contorno e coeficiente de Manning, análise hidráulica e obtenção dos resultados através da ferramenta de RAS Mapper do programa.

O HEC-RAS 2D disponibiliza cinco diferentes metodologias para aplicações com fluidos, das quais quatro são para fluidos não-Newtonianos, são eles: Método de Bingham, Equação Quadrática de O'Brien, Método Clástico e Método de Herschel-Bulkley. A metodologia utilizada para o presente trabalho, conforme mencionado no item de critérios e premissas, foi a metodologia de Bingham. Esse método é usual para corridas de lama devido à melhor adaptação de fluxos menos concentrados a modelos lineares. Para aplicação desse método, são necessários dois parâmetros: a tensão de escoamento e a viscosidade.

A tensão de escoamento é um parâmetro de essencial conhecimento no tocante a modelos reológicos, a qual consiste na faixa de tensões em que não há movimentação na matéria, ou seja, é a tensão a partir da qual o material passa a ter deformação permanente, deixando de trabalhar na sua zona elástica. Já em âmbitos matemáticos, a tensão de escoamento consiste no ponto de interceptação do eixo y do gráfico da relação tensão-deformação. Diante desse entendimento, pode-se entender que uma das mais importantes diferenças entre fluidos Newtonianos e fluidos Não-Newtonianos é a existência de uma tensão de escoamento, a qual, para fluidos Newtonianos, esta interceptação é zero, ou seja, esse tipo de fluido necessita de estímulos mínimos para deformar, enquanto os fluidos Não-Newtonianos possuem uma faixa de tensões a qual o fluido não deforma e, a partir de um determinado valor de tensão, este passa a deformar. A Figura 34 apresenta as relações lineares tensão-deformação para fluidos Newtonianos (água) e para um fluido Não-Newtoniano pela metodologia de Bingham. Vale ressaltar que existem outras metodologias aplicáveis para fluidos Não-Newtonianos, sendo estas relações não lineares.

Figura 34 - Relações lineares tensão-deformação para fluidos Newtonianos e fluido Não-Newtoniano.



Fonte: Adaptado de USACE (2022).

Os fluidos Newtonianos não possuem forças internas, portanto, conforme mencionado, eles deformam sobre o mínimo de estímulos externos e, continuam a deformar enquanto estiver sobre declividades decrescentes. Já os fluidos Não-Newtonianos possuem forças internas e mesmo em declividades decrescentes podem entrar em repouso. Este momento é denominado de “run out”, ou seja, significa que o fluido entrou em repouso, pois as forças internas de interação entre as partículas superaram os estímulos relativos às declividades decrescentes.

4.1.3.2.1 Tensão de Escoamento

Conhecendo a dificuldade em mensurar a tensão de escoamento em fluidos Não-Newtonianos, o HEC-RAS 2D disponibiliza três métodos empíricos: Método Exponencial, Método Tensão de Escoamento e Método de Coulomb. O Método Exponencial relaciona a tensão de escoamento ao coeficiente volumétrico. Esse método incorpora três parâmetros: coeficientes a e b , além do próprio coeficiente volumétrico (C_v), conforme a Equação 10.

$$\tau_y = ae^{b.C_v} \quad (10)$$

Em que,

- a e b consistem em parâmetros de calibração;
- C_v é o coeficiente volumétrico, entre 0 e 1.

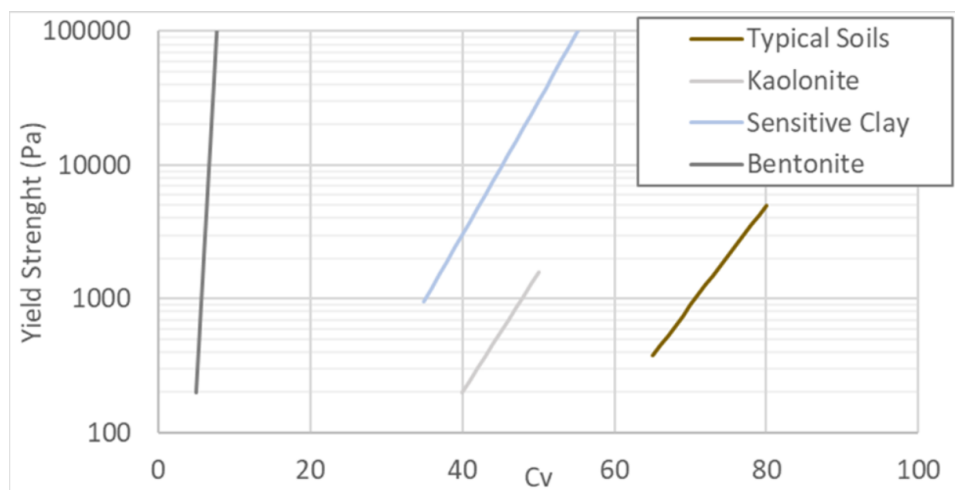
Vale ressaltar que, para casos em que não é possível realizar ensaios laboratoriais, o HEC-RAS 2D disponibiliza a referência bibliográfica de O'Brien e Julien (1998) para obtenção dos parâmetros de calibração a e b , conforme Tabela 4 e Figura 35.

Tabela 4 - Parâmetros de tensão de escoamento para o Método Exponencial.

Tipo	Limite Cv	a	b	Tensão (Pa)
Solo Típico	65% - 80%	0.005	17.2	375 - 5.000
Caulinita	40% - 50%	0.05	20.7	200 - 1.600
Argilas sensíveis	35% - 60%	0.3	23	950 - 300.000
Bentonita	5% - 20%	0.002	230.3	200 - 2E+17

Fonte: Adaptado de USACE (2022).

Figura 35 - Relação tensão de escoamento-coeficiente volumétrico (Cv) para os tipos de fluidos Não-Newtonianos.



Fonte: Adaptado de USACE (2022).

4.1.3.2.2 Viscosidade

A análise da viscosidade dinâmica na mistura consiste em analisar os impactos da fase sólida na relação tensão-deformação da mistura. De forma geral, a viscosidade, para o Método de Bingham, consiste na inclinação da reta que representa a relação tensão-deformação. O HEC-RAS 2D disponibiliza quatro metodologias para obtenção da viscosidade dinâmica da mistura, são elas: Método de Maron and Pierce, Método Exponencial, Método da Viscosidade Dinâmica da Mistura e Método da Relação Visco. O Método Exponencial relaciona a viscosidade com o coeficiente volumétrico através de um coeficiente na equação exponencial

(Equação 11).

$$\mu r = e^{B.Cv} \quad (11)$$

Em que,

- B consiste no parâmetro de calibração, obtido pela Tabela 5;
- Cv é o coeficiente volumétrico, entre 0 e 1.

Tabela 5 - Coeficiente de calibração para a viscosidade dinâmica pelo método exponencial.

Material	B
Solo Típico	8
Caulinita	8
Argilas sensíveis	5
Bentonita	100

Fonte: Adaptado de USACE (2022).

4.1.3.3 Modelo RiverFlow2D – abordagem hidráulica

O *software* RiverFlow2D consiste em um programa de simulação hidráulica e hidrológica para fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos, através de um modelo de escoamento bidimensional (2D). A malha triangular possibilita uma adequação do campo de fluxo em qualquer ambiente fluvial, utilizando o método de solução de volumes finitos estável.

Conforme Gonçalves (2017), o programa possibilita inclusão de estruturas hidráulicas, tais como bueiros, barragens, pontes, atribuindo condições de contorno e obtendo maior precisão no tocante ao cálculo das perdas de carga. Além disso, o *software* possui interface baseada na modelagem de água superficial (Surface-Water Modeling Solution – SMS), o qual possui integração com o GIS. Essa interação permite o usuário definir e refinar a malha, atribuir condições de contorno e coeficiente de rugosidade, possibilitando domínio de toda a modelagem.

O RiverFlow2D utiliza modelos matemáticos baseados na teoria de águas rasas, em que a escala de comprimento vertical é consideravelmente menor que a escala de comprimento horizontal. Portanto, as equações são derivadas de profundidade e as velocidades verticais são consideradas uniformes. As equações

12 a 14.

➤ Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

➤ Momento na direção x:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} = 0 \quad (13)$$

➤ Momento na direção y:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} = 0 \quad (14)$$

Em que,

- x, y são as coordenadas horizontais;
- t é o tempo;
- η consiste na elevação da superfície de água;
- h é a profundidade da água;
- u, v é a velocidade da profundidade média na direção x e y;
- ρ consiste na densidade da água;
- g é a aceleração da gravidade;
- τ_{bx}, τ_{by} consistem nos termos de atrito do leito, calculados através das equações 15 e 16.

$$\tau_{bx} = \frac{gn^2 U \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (15)$$

$$\tau_{by} = \frac{gn^2 V \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (16)$$

Em que,

- n é o coeficiente de Manning.

No tocante as condições de contorno, existem duas opções no RiverFlow2D: condições abertas e as condições fechadas. Para as condições abertas, o fluxo pode entrar ou sair da área de modelagem e para as condições fechadas, consideram-se barreiras, como paredes rígidas que bloqueiam o fluxo. Além disso, é possível inserir diversas condições de entrada e saída, sendo possível realizar combinações. As condições de contorno disponíveis no software estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Tipos de condições de contorno disponíveis no RiverFlow2D.

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

Fonte: Hydronia (2016).

4.2 MÉTODOS

O presente item apresenta os métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, os quais são divididos em métodos hidrológicos e métodos hidráulicos.

4.2.1 Métodos hidrológicos

Os métodos hidrológicos consistem basicamente na elaboração dos estudos hidrológicos da região onde localiza-se o reservatório de estudo. Esta etapa

subsidiará a obtenção de dois dados essenciais para a modelagem hidráulica, o hidrograma de ruptura e a cota gatilho do rompimento. Os processos estão detalhados a seguir.

4.2.1.1 Estudos hidrológicos

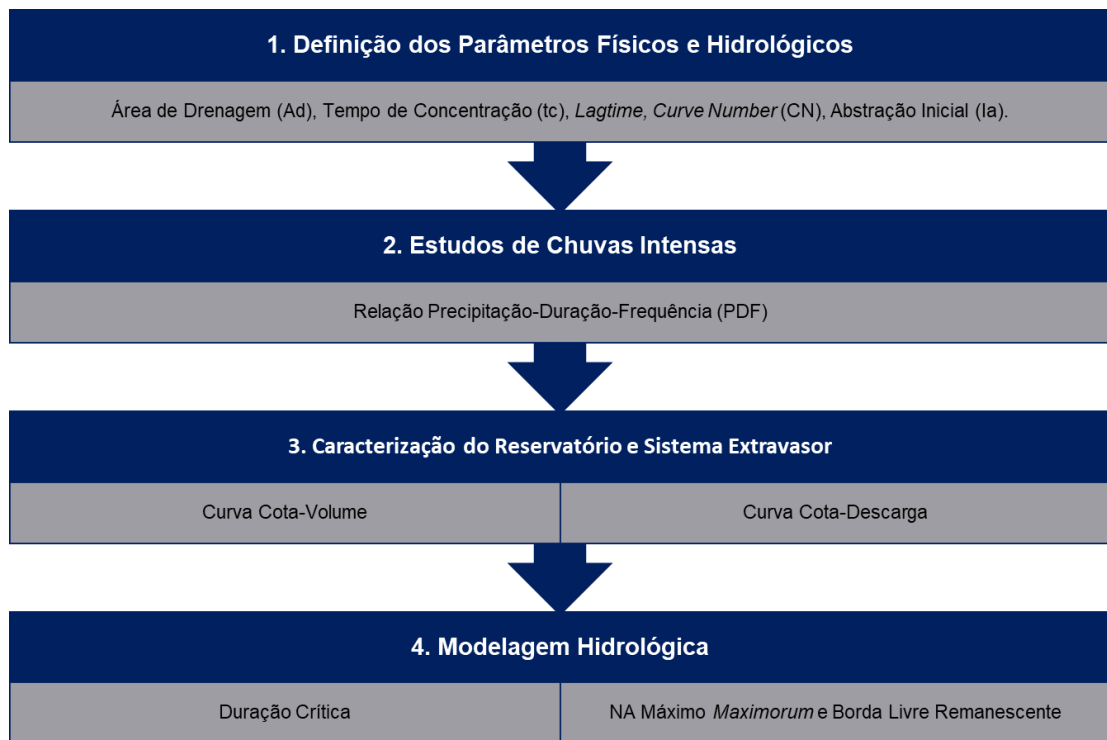
De maneira geral, os estudos hidrológicos possuem a finalidade de subsidiar dimensionamentos de estruturas hidráulicas. No entanto, para um estudo de ruptura hipotética de uma barragem, os estudos hidrológicos subsidiam a obtenção do hidrograma de ruptura. Para isso, foi realizado, inicialmente, o trânsito de cheias no reservatório de estudo, conforme detalhado a seguir.

4.2.1.1.1 Estudos do trânsito de cheias

Os estudos de trânsito de cheias possuem a finalidade de obter o nível de água máximo *maximorum*, o qual relaciona-se à cheia máxima provável, chuva afluyente ao reservatório e que é decorrente da precipitação máxima provável (PMP). Para a elaboração do estudo de trânsito de cheias, é necessário caracterizar a bacia de contribuição atrelada ao reservatório, identificando os parâmetros físicos e hidrológicos.

Sendo assim, as etapas metodológicas seguidas estão apresentadas no fluxograma a seguir na Figura 36.

Figura 36 - Etapas do estudo de trânsito de cheias.



Fonte: A Autora (2023).

4.2.1.1.1.1 Caracterização física da bacia de contribuição

A caracterização da região de estudo consiste em uma etapa essencial para detalhar o escoamento e o caminho o qual o fluxo irá percorrer até o reservatório. Portanto, foi determinada a bacia de contribuição da estrutura e seus parâmetros físicos, como área de drenagem (Ad), *Curve Number* (CN), abstração inicial (Ia), tempo de concentração (tc) e *lagtime*. Para cada parâmetro foi utilizada uma metodologia, as quais serão detalhadas neste item.

A área de drenagem consiste na própria área interna do reservatório, pois os reservatórios, de maneira geral, não recebem aporte de água pluvial das áreas no entorno, diferentemente das barragens. Portanto, foi utilizada a base topográfica disponibilizada para delimitação da área de drenagem e obtenção de seu valor.

O *Curve Number* (CN) é o parâmetro relacionado ao uso e ocupação do solo da bacia de contribuição, o qual representa a porcentagem de impermeabilidade do solo. Para a obtenção do seu valor, foi disponibilizado um estudo específico pela mineradora. No entanto, das formas tradicionais, o CN é calculado com auxílio de imagens de satélites e bibliografias, como por exemplo Chow *et al* (1964) e Tucci (2001). A depender da bibliografia utilizada, para cada tipo de uso e ocupação do

solo é atribuído um valor de CN. Portanto, é realizado um cálculo de ponderação entre as áreas para obtenção do valor de CN final, sendo este o valor do CN para a bacia de contribuição em análise.

No tocante à abstração inicial (I_a), este parâmetro está relacionado às perdas iniciais, ou seja, é a parcela de chuva produzida no começo da precipitação até o instante em que se origina, de fato, o escoamento superficial. Sendo assim, referindo-se às etapas do ciclo hidrológico, a abstração inicial consiste no armazenamento na superfície, a parcela que infiltrou no solo e a parcela de evapotranspiração. Este parâmetro foi obtido através da Equação 17:

$$I_a = 0,2S \quad (17)$$

Em que, S consiste na capacidade de infiltração e é calculada a partir do CN da bacia, através da Equação 18:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (18)$$

O tempo de concentração (t_c) consiste no tempo necessário em que uma gota d'água percorre o caminho mais longo da bacia de contribuição até chegar no seu exutório. Foi utilizada a metodologia de Kirpich, apresentada na bibliografia de Pinheiro (2011) e recomendada para bacias pequenas (Equação 19).

$$t_c = 57. \left(1 + \frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (19)$$

Em que,

- t_c é o tempo de concentração em horas;
- L é o comprimento do talvegue principal em km;
- Δh é a diferença de altitude ao longo do talvegue em m.

O parâmetro de *lagtime*, também denominado de tempo de retardo, está relacionado ao tempo existente entre o centro de massa do histograma de

precipitação até a vazão de pico do hidrograma. Para este parâmetro, adota-se o valor de 60% do tempo de concentração.

Os parâmetros físicos da bacia de contribuição calculados e obtidos subsidiaram a modelagem hidrológica realizada no software HEC-HMS. Estes estão sintetizados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros físicos e hidrológicos da bacia de contribuição do reservatório de estudo.

Parâmetros Físicos da Bacia de Contribuição	
Área (km ²)	0,56
tc (min)	38,77
<i>Lagtime</i> (min)	23,26
CN	99
la (mm)	0,51

Fonte: A Autora (2023).

4.2.1.1.1.2 Chuvas intensas

A caracterização da pluviometria da região é um aspecto de extrema relevância para o estudo de trânsito de cheias, visto que subsidia a quantificação do fluxo que será escoado no terreno e posteriormente transformado em vazão afluente no reservatório. Nesse contexto, as chuvas intensas estão relacionadas com as precipitações máximas de ocorrência extrema em uma região, as quais, para o presente trabalho, foram disponibilizadas através de um estudo de chuvas intensas para a mina e não foram apresentados devido à informações sigilosas de posse da mineradora.

De forma geral, o estudo de chuvas intensas se baseou em dados de precipitação de medições diárias na estação mais próxima da região, no período de 01/01/1972 a 31/08/2021. Em seguida, foi verificado que os máximos anuais de cada ano hidrológico ocorreram entre dezembro e o mês de novembro do ano seguinte. Com isso, foi realizada a transformação das alturas de chuvas máximas de 1 dia para 24 horas, através de um fator de multiplicação igual a 1,14. Foi realizada também a distribuição de probabilidade teórica e a verificação por um teste de aderência para chuvas de 24 horas a 180 dias. Por fim, foi feita a discretização.

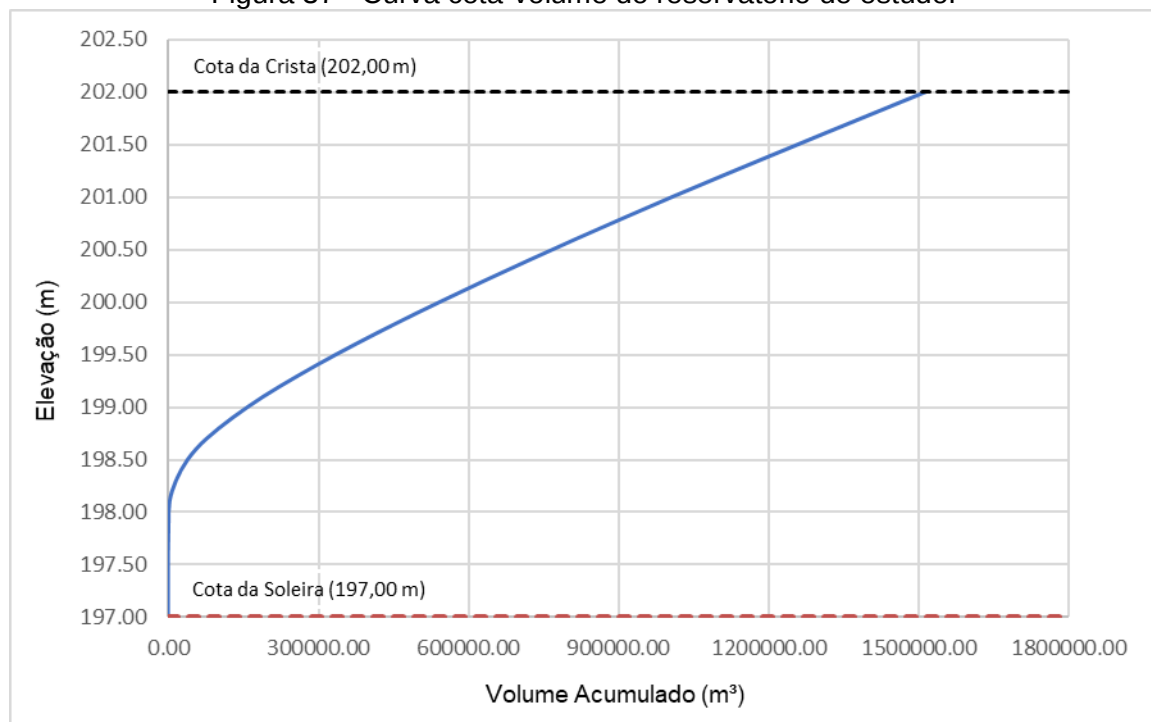
Em mãos a relação precipitação-duração-frequência, foi realizada a discretização dos quantis de precipitação em intervalos menores que a duração da

chuva. Para isso, foi utilizada a metodologia de Huff, com distribuição da precipitação do 2º quartil para chuvas com durações até 12 horas e 3º quartil para chuvas com durações superiores a 12 horas.

4.2.1.1.1.3 Curva cota-volume

Através do levantamento topográfico disponibilizado, o qual foi realizado em 2018, foi possível extrair a curva cota-volume do reservatório de estudo, utilizando o software AutoCAD Civil 3D. Sendo assim, conforme a Figura 37, é possível concluir que a capacidade de armazenamento até a crista do reservatório é de 1,52 Mm³.

Figura 37 - Curva cota-volume do reservatório de estudo.



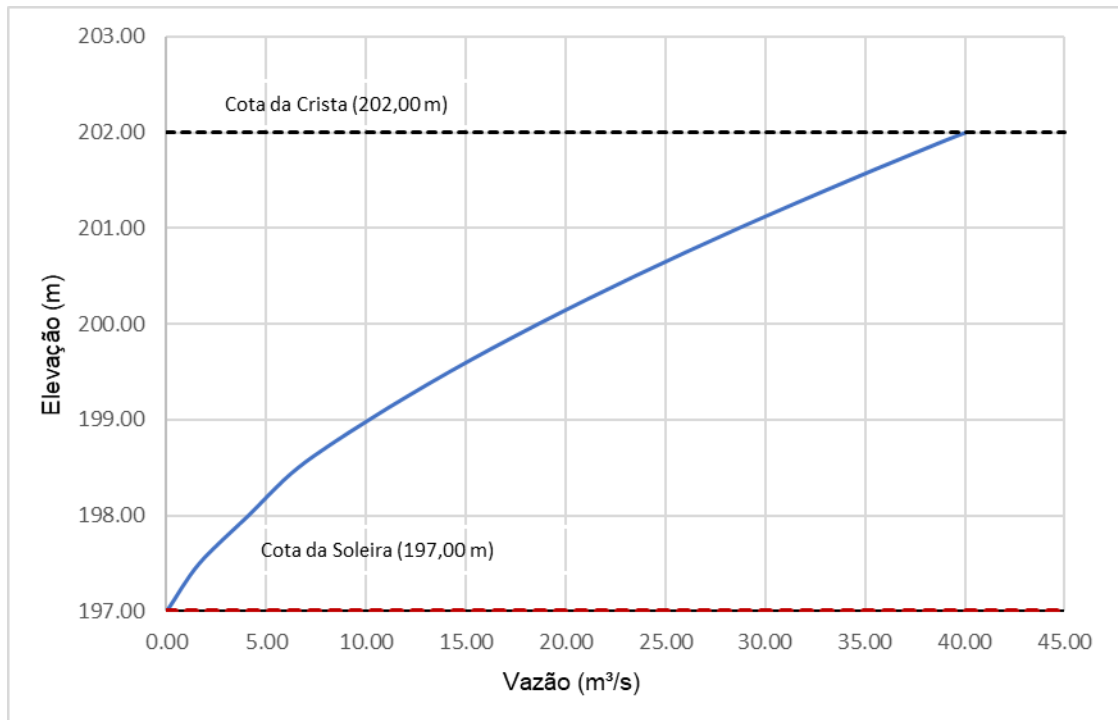
Fonte: A Autora (2023).

4.2.1.1.1.4 Curva cota-descarga do extravasor

O reservatório de estudo possui um extravasor do tipo galeria dupla em concreto armado, com seção retangular e dimensões 1,50 m x 1,50 m. Logo a jusante do extravasor existe dois trechos em degraus, seguido de um trecho intermediário inclinado linearmente e uma bacia de dissipação, por onde a água escoava para uma estrutura que tem a função de realizar o tratamento do fluxo.

A curva cota-descarga do sistema extravasor utilizada na modelagem hidráulica foi disponibilizada, a qual está apresentada na Figura 38.

Figura 38 - Curva cota-descarga do reservatório de estudo.



Fonte: A Autora (2023).

4.2.1.1.1.5 Modelo hidrológico

O modelo hidrológico utilizado para o estudo de trânsito de cheias foi o modelo matemático desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center*, órgão colegiado do *U.S. Army Corps of Engineers*, com o auxílio do software HEC-HMS 4.9. No tocante aos dados de entrada do modelo, os dados de precipitação foram convertidos em chuvas afluentes ao reservatório através do método proposto pelo *Natural Resources Conservation Service* (NCRS) e os hidrogramas de vazão foram obtidos pela metodologia *SCS Unit Hydrograph Transform*.

De acordo com os critérios definidos pela Resolução nº 95 da ANM (ANM, 2022), de fevereiro de 2022, o período de retorno que deve ser adotado para fins de dimensionamento de sistemas extravasores, durante o período de operação do reservatório, está relacionado ao Dano Potencial Associado (DPA) da estrutura, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Tempo de retorno mínimo em função do DPA.

DPA	Tempo de Retorno para período operacional
Baixo	500 anos
Médio	1.000 anos
Alto	10.000 anos ou PMP, a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema extravasor

Fonte: ANM (2022).

No entanto, o critério muda para estruturas em período de desativação ou descaracterização, ainda de acordo com a Resolução nº 95 da ANM (ANM, 2022), de fevereiro de 2022. Para o dimensionamento de sistemas extravasores em reservatórios em descaracterização, independente do Dano Potencial Associado (DPA), o tempo de retorno adotado deve ser de 10.000 anos ou PMP (Precipitação Máxima Provável), a que for mais restritiva para duração crítica do sistema extravasor. Portanto, como o reservatório de estudo possui, atualmente, DPA alto, foi adotado a PMP para o tempo de retorno, considerando que as alturas pluviométricas são mais significativas e, conseqüentemente, trazem um cenário mais restritivo para a duração crítica do extravasor.

Após inserção dos dados de entrada no modelo, para a simulação do trânsito de cheias, foi utilizada a metodologia de Puls Modificado ou *Level Pool Routing*. Essa metodologia considera a conservação da massa, ou seja, um balanço do fluxo afluente e efluente, em conjunto com as curvas cota-volume, cota de descarga e hidrograma de vazões afluentes ao reservatório.

De acordo com Araújo *et al.* (2022), o método de Puls funciona através de um rearranjo da equação da continuidade e é aplicado, geralmente, para subsidiar o dimensionamento de reservatórios que operam amortecendo cheias. No entanto, para aplicação desse método, é necessário considerar alguns critérios e premissas, são eles:

- Adota-se que a superfície da água é horizontal;
- A vazão defluente consiste em uma função do volume de armazenamento do reservatório;
- A variação da vazão defluente do reservatório é linear conforme o tempo.

Para o presente trabalho, o método de Puls foi utilizado para a simulação do

trânsito de cheias, através da propagação de cheia no reservatório, o que possibilitou obter os resultados de duração crítica, NA Máximo *Maximorum* e borda livre remanescente. O intuito da realização da modelagem hidrológica é simular as condições da bacia de contribuição e de enchimento do reservatório, conhecendo os parâmetros físicos e hidrológicos da bacia, descritos no item 4.2.1.1.1, juntamente com as curvas cota-volume, cota de descarga e hidrograma de vazões afluentes, visando obter a duração crítica, ou seja, o evento crítico, e estimar as vazões máximas de cheias de projeto. Essa etapa subsidiará o estudo de ruptura hipotética (*dam break*), o qual será detalhado no capítulo seguinte. A Figura 39 apresenta um diagrama da modelagem hidrológica utilizada no HEC-HMS.

Figura 39 - Diagrama unifilar do modelo hidrológico.



Fonte: A Autora (2023).

4.2.1.1.1.6 Duração crítica, na máximo maximorum e borda livre remanescente

A duração crítica retrata o pico do evento de cheia, o qual gera a maior sobrelevação do nível d'água no reservatório, denominado NA Máximo *Maximorum*. A obtenção desse resultado através do estudo de trânsito de cheias permite verificar a possibilidade de ocorrência do fenômeno de galgamento, o qual consiste na passagem do rejeito pela crista da barragem e, conseqüentemente, a ruptura da estrutura. Ressalta-se que o galgamento não é o único modo de ruptura em barragens, mas consiste em um fator a ser verificado e seu estudo permite análises como: averiguação das condições atuais do reservatório, análise e adequação do

sistema extravasor, dimensionamento de reservatórios, assim como para fins de estudos de ruptura, finalidade deste capítulo do presente trabalho.

A borda livre remanescente, em barragens, consiste no espaço livre entre o NA Máximo Maximorum e a cota da crista. Esse espaço é obrigatório e possui a finalidade de absorver as ondas advindas de ventos, além de fornecer segurança em caso de possíveis recalques da crista da barragem. De acordo com Pinheiro (2011), para barragens de mineração, a borda livre mínima a ser adotada é de 1,0 m.

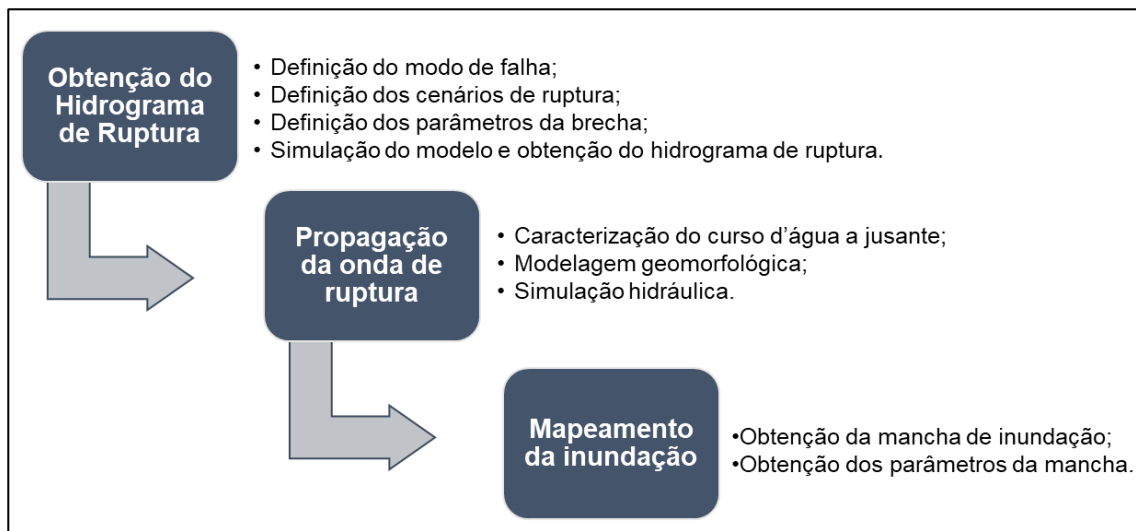
4.2.2 Métodos hidráulicos

Neste item será apresentado as metodologias consideradas no âmbito hidráulico, os quais incluem o modo de falha adotado para a estrutura, nos cenários de simulação, critérios e premissas adotados na modelagem, nas metodologias utilizadas para obtenção dos parâmetros reológicos, critério de parada e condições de estabilidade adotados, bem como nas seções transversais traçadas para análise comparativa dos resultados.

4.2.2.1 Síntese metodológica

Um estudo de ruptura hipotética engloba dados e informações gerais da barragem, a partir dos quais serão instituídos critérios, premissas e metodologias aplicáveis de forma adequada para a estrutura. Portanto, o estudo consiste basicamente em três etapas principais: obtenção do hidrograma de ruptura, propagação da onda de ruptura e mapeamento da inundação. Através dos dados de entrada e softwares específicos para as simulações, são vencidas as três etapas. Na Figura 40, apresenta-se o fluxograma das etapas e as atividades desenvolvidas em cada uma.

Figura 40 - Etapas de um estudo de ruptura hipotética.



Fonte: A Autora (2023).

4.2.2.2 Modo de falha

Visando compreender como se dará a ruptura de uma barragem, é necessário entender quais modos de falha a estrutura está susceptível e caracterizar os potenciais eventos que possibilitam o gatilho de tais modos de falha. Conforme a Resolução nº 95 (ANM, 2022), de 7 de fevereiro de 2022, a partir dessa análise, considera-se, para fins de simulação de ruptura, o modo de falha que apresenta maior dano potencial possível, ou seja, aquele relacionado ao cenário mais catastrófico a jusante da barragem, denominado modo de falha crítico. Para isso, é necessário conhecer a estrutura, seu estado, método construtivo, entender seus componentes, analisar relatórios de inspeção, avaliações geotécnicas e estudos da barragem em geral.

De forma geral, os modos de falha de uma barragem são: rupturas por eventos hidrológicos, falhas geológicas, falhas estruturais, falhas por indução sísmica, falhas por indução humana e liquefação.

As rupturas por eventos hidrológicos consistem em: galgamento (overtopping), o qual pode ocorrer devido a problemas como vertedouro inadequado ou obstruído, rebaixamento da crista; sobrecarregamento nas estruturas; erosão superficial do maciço devido a velocidades elevadas, ações de ondas, etc. Já as falhas geológicas, pode-se citar rupturas por pipping (erosão interna) e instabilidade no talude.

No tocante a rupturas por falhas estruturais, os modos de falha mais comuns são nos taludes de montante ou jusante e componentes. As falhas por indução sísmica consistem nas atividades sísmicas naturais e artificiais. Por fim, das falhas por indução humana, é possível mencionar a falta de manutenção, atos de guerra, incidentes terroristas, rebaixamento, entre outros.

No caso do reservatório de estudo, o modo de falha crível de ruptura é o pipping, pois o maciço foi construído sem compactação adequada, além de não possuir um sistema de drenagem interna. Sendo assim, este modo de falha foi considerado para fins de simulação de ruptura do presente trabalho.

4.2.2.3 Cenário de simulação

Conforme ANA (2016), deve-se simular o menor número de cenários possível, sendo recomendado a simulação dos seguintes cenários:

- Sem ruptura
 - Dia seco (*sunny day*): cenário de cheias ordinárias;
 - Dia chuvoso (*rainy day*): cenário de operação hidráulica extrema - corresponde ao evento da cheia de projeto.
- Com ruptura
 - Dia seco (*sunny day*): cenário de ruptura mais provável - corresponde a ruptura por mecanismos estruturais ou percolação em dia de sol (sem precipitação) ou ruptura por mecanismo hidráulico (galgamento).
 - Dia chuvoso (*rainy day*): cenário de ruptura mais desfavorável ou extremo - corresponde a ocorrência de rupturas rápidas e totais.

Após a simulação dos cenários de ruptura adotados, considera-se o pior cenário como resultado da ruptura, ou seja, aquele resultante na pior mancha de inundação em termos de extensão e a qual apresenta elevado dano ambiental, social ou financeiro. Sendo assim, tendo em vista que o objetivo do presente trabalho consiste em comparar os resultados da ruptura nos softwares HEC-RAS 2D e RiverFlow2D, foi apresentado somente o cenário de ruptura mais desfavorável ou extremo, visto que este consiste no pior cenário.

O cenário em questão consiste no cenário de ruptura mais desfavorável ou extremo em dia chuvoso (*rainy day*), com rompimento na parede ao norte do

reservatório devido a existência a jusante de um setor industrial e devido ao possível impacto a um conjunto habitacional localizado nas proximidades.

4.2.2.4 Critérios e premissas

O avanço do trabalho contou com a adoção de critérios e premissas descritos a seguir, estando estes em consonância com o objetivo do estudo e para o cenário de ruptura adotado, o cenário de ruptura extrema em dia chuvoso (*rainy day*). Sendo assim, os critérios e premissas considerados para o estudo estão detalhados neste item para cada etapa do trabalho.

➤ Hidrograma de ruptura:

- Para a elevação inicial do nível d'água para o reservatório, foi considerado, a princípio, o NA Máximo *Maximorum* (198,52 m), associado à Precipitação Máxima Provável (PMP). No entanto, foi realizado um estudo de sensibilidade acerca da condição inicial do reservatório, sendo necessário a alteração desta elevação para a cota 201,00 m, visto que a chuva de projeto não consiste em contribuições significativas suficientes para acionar o gatilho da ruptura;
- A crista da barragem apresenta-se na cota 202,00 m;
- Conforme topografia disponibilizada, a elevação a jusante do pé do maciço da parede norte é igual a 193,60 m, sendo esta a elevação da base da brecha considerada;
- A cota de início do pipping foi adotada igual a 193,60 m, sendo esta a mesma cota da base da brecha;
- A forma final da brecha foi considerada como trapezoidal, conforme recomendado por Froehlich e Tufail (2004);
- Os parâmetros da brecha foram obtidos pelas equações contidas no estudo de Fread (2001), as quais serão detalhadas posteriormente;
- A componente horizontal da declividade das laterais da brecha foi adotada como sendo igual a 1;
- O coeficiente de pipping adotado foi igual a 0,7, considerando as

equações dos parâmetros da brecha;

- De acordo com a documentação disponibilizada, a elevação máxima de rejeitos é igual a 201,00 m, sendo esta a cota de gatilho do piping considerada no estudo.

➤ Propagação da onda de ruptura:

- A malha adotada para a simulação foi 30 x 30;
- O coeficiente de Manning adotado foi igual a 0,05;
- Para as condições de contorno do modelo, foi adotado o hidrograma de ruptura para as condições de entrada e a profundidade normal para as condições de saída;
- Foi adotada a calha do rio com uma vazão de base constante de 8 m³/s;
- Diante da disponibilidade dos parâmetros e considerando a metodologia mais usual para corrida de lama (característica do escoamento do fluxo de rejeito mobilizado na ruptura do reservatório de estudo, conforme mencionado no item 4.2.2.6), foi adotado o Método de Bingham para a inserção dos parâmetros não-Newtonianos;
- Os parâmetros não-Newtonianos utilizados para a etapa reológica do trabalho estão detalhados no item 4.2.2.6;

➤ Mapeamento da inundação

- Após a obtenção dos resultados nos *softwares*, foi utilizado o software QGIS para pós-processamento, no qual foi definido o layout dos mapas e elaboração dos mapas representativos;

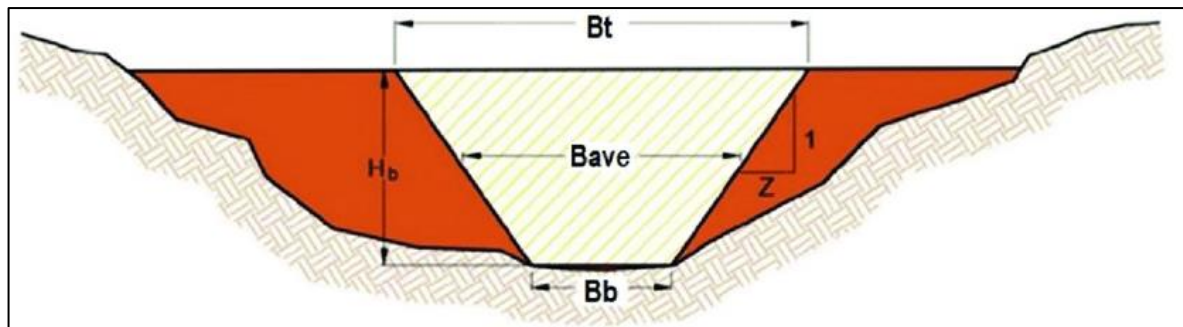
4.2.2.5 Parâmetros da brecha

Os parâmetros de uma brecha de ruptura consistem, de forma geral, na largura da base e no seu tempo de formação. Existem diversas metodologias que permitem o cálculo dos parâmetros da brecha, as quais podem ser empíricas e baseadas em modelos físicos, paramétricos ou estocásticos. Para o presente

estudo, os parâmetros foram obtidos através de modelos empíricos recomendados por literatura. No entanto, vale ressaltar que modelos empíricos são modelos desenvolvidos a partir de casos históricos, não sendo obrigatoriamente representativos para qualquer tipo de barragem. Ainda destaca-se que a definição da brecha de ruptura e suas características dependem do tipo de barragem, topografia, características da fundação, entre outras, que podem trazer incertezas ao modelo.

No tocante a geometria da brecha, foi considerado o formato trapezoidal, conforme recomendado por Froehlich e Tufail (2004), conforme a Figura 41.

Figura 41 - Geometria e parâmetros da brecha de ruptura.



Fonte: Santos *et al.* (2019).

A largura média da brecha (BR) e o tempo de formação da brecha foram calculados conforme Fread (2001), através das equações 20 a 23.

$$BR = 9,5 k_0 \cdot (V_M \cdot HB)^{0,25} \quad (20)$$

Em que,

- BR é a largura média da brecha em pés;
- K0 é o coeficiente, o qual deve ser igual a 0,7 para piping e 1,0 para galgamento;
- VM consiste no volume mobilizado em acre-pé;
- HB é a altura da brecha em pés, correspondente a diferença do nível da crista da barragem para a base da brecha no caso de galgamento e, diferença entre o N.A. máximo normal ou elevação máxima de rejeitos e a base da brecha no caso de piping.

$$TFH = 0,3.V_M^{0,53}/HB^{0,9} \quad (21)$$

Em relação ao volume mobilizado na ruptura, este corresponde ao volume de sólidos e de água, o qual, para ser estimado, é necessário levar em consideração o modo de falha. Sendo assim, neste caso, o volume de água mobilizado consiste no volume acumulado acima da praia de rejeitos até a elevação do modo de falha considerado, o volume de rejeitos engloba o volume acima da elevação da base da brecha e o volume do maciço consiste no volume da brecha adotada.

O volume de água mobilizado consiste no volume acumulado entre a praia de rejeitos e o N.A. máximo maximorum, obtido no estudo de trânsito de cheias. Já o volume de rejeitos mobilizado na ruptura foi obtido através da diferença entre a geometria da barragem pós ruptura e a geometria antes da ruptura, conforme equações recomenda Ribeiro *et al* (2016). A metodologia consiste na equação do volume de rejeitos mobilizado, conforme a seguir.

$$VR = (A.h)/2 \quad (22)$$

$$A = \pi.a.b \quad (23)$$

Em que,

- A consiste na área da ruptura em m²;
- h é a altura dos rejeitos no reservatório em m;
- a consiste no comprimento da ruptura em m;
- b é a largura da ruptura em m.

A metodologia proposta por Ribeiro *et al.* (2016) considera a resistência residual pós liquefação dos rejeitos depositados, obtido em ensaios de caracterização do rejeito, e os parâmetros a e b referem-se a idealização de uma ruptura em elipse. Para obtenção desses parâmetros, foram disponibilizados estudos reológicos do rejeito. Os dados de entrada utilizados no modelo de ruptura no software HEC-HMS estão apresentados na Tabela 9 de forma sintetizada.

Tabela 9 - Dados de entrada no modelo HEC-HMS.

Bacia de Contribuição	
Área (km ²)	0,56
tc (min)	38,77
Lagtime (min)	23,26
CN	99
Ia (mm)	0,51
Reservatório	
Cota inicial (m)	198,52
N.A. máximo <i>maximorum</i> (m)	
Cota da crista (m)	202,00
Cota mais baixa do reservatório (m)	193,60
Cota de começo do piping (m)	193,60
Parâmetros da Brecha	
Largura média da brecha - BR (m)	67,20
Largura da base da brecha - BBD (m)	58,80
Coeficiente - K0	0,70
Volume mobilizado na ruptura - VM (Mm ³)	0,85
Altura da brecha - HB (m)	7,40
Elevação máxima de rejeitos (m)	201,00
Elevação da base da brecha (m)	193,60
Desnível entre a crista e a base da brecha - HD (m)	8,40
Inclinação dos taludes	1
Coeficiente de <i>piping</i>	0,70
Tempo de formação da brecha (h)	0,54
Cota de gatilho da brecha (m)	201,00

Fonte: A Autora (2023).

4.2.2.6 Parâmetros reológicos

O estudo de ruptura de uma barragem de mineração exige o conhecimento das características reológicas do material, ou seja, o estudo do comportamento do rejeito. De forma geral, o estudo reológico analisa e quantifica o escoamento e a deformação do material quando o mesmo está submetido a forças distintas.

O estudo do comportamento do fluxo do material mobilizado subsidiará a etapa de modelagem hidráulica, a qual requer, além dos parâmetros reológicos, o coeficiente volumétrico referente ao fluxo mobilizado. Portanto, conforme estudos disponibilizados, o valor obtido para o coeficiente volumétrico referente ao fluxo do volume mobilizado foi de 27%, aproximadamente. Para obtenção desse coeficiente, foi utilizada a metodologia proposta por Ribeiro *et al.* (2016), a qual utiliza o índice de vazios médio do fluxo dos rejeitos mobilizado no cálculo.

Após análise do coeficiente volumétrico (C_v) do fluxo de rejeitos mobilizado, classifica-se o fluido como Newtoniano ou não-Newtoniano. Conforme a Tabela 3, mencionada no item 3.2.3.2, o fluido é considerado Newtoniano quando o C_v for menor que 20%, já para fluido não-Newtoniano, o C_v varia entre 20% e 50%. Para valores de C_v superior a 50%, não considera-se o material como fluido e sim, como fluxo granular. Sendo assim, o material mobilizado na ruptura do reservatório de análise é considerado um fluido não-Newtoniano, com valor de C_v igual a 27%, com característica de escoamento sendo uma corrida de lama.

Além do coeficiente volumétrico (C_v), para fins de análise da ruptura, os parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade do material são os principais parâmetros reológicos necessários, os quais foram obtidos através da metodologia de O'Brien e Julien (1988), conforme as equações a seguir e a Tabela 10.

➤ Viscosidade dinâmica:

$$\mu = \frac{0,648 \cdot e^{6,2 \cdot C_v}}{10} \quad (24)$$

➤ Tensão de escoamento:

$$\sigma_y = \frac{0,0765 \cdot e^{16,9 \cdot C_v}}{10} \quad (25)$$

Tabela 10 - Parâmetros reológicos utilizados na modelagem hidráulica.

Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	0,343
Tensão de Escoamento (Pa)	0,721

Fonte: A Autora (2023).

4.2.2.7 Critério de parada

O critério de parada consiste na definição do momento em que a simulação termina, sendo recomendável que a propagação da onda de ruptura se estenda até a condição de escoamento definida, em que os incrementos de áreas inundáveis se tornem desprezíveis e não gerem ameaças ao vale a jusante.

O Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016) considera a fronteira física localizada a jusante da barragem como o critério mais adequado para fixação do

limite da simulação. As fronteiras consistem em um rio de maior dimensão, um reservatório a jusante ou até mesmo o oceano. Também pode ser considerada uma seção que caracterize o risco como aceitável, conforme já mencionado.

A Agência Federal de Gestão de Emergências norte-americana (FEMA, 2013) considera como risco aceitável uma sobrelevação incremental de inundação de até 2 pés, o que equivale a 60 cm aproximadamente.

Para o presente trabalho, foi adotado o critério de parada da fronteira física a jusante do reservatório de estudo. Portanto, a propagação da onda se estendeu até uma rodovia, localizada a 2,5 km aproximadamente (distância perpendicular entre o reservatório e a via), onde não houve superação da mancha.

4.2.2.8 Condição de courant

Um resultado satisfatório de uma modelagem de onda de cheia está atrelado a escolha de valores coerentes para o incremento temporal, denominado de intervalo de cálculo, utilizado na solução computacional. De acordo com Rocha (2015), o intervalo de cálculo interfere diretamente na estabilidade do modelo. Intervalos muito pequenos geram aumento do tempo e esforço computacional, além de instabilidade, e intervalos muito grandes geram atenuação da vazão de pico e instabilidade no modelo.

Portanto, a condição de Courant é utilizada para estabelecer o intervalo de cálculo adequado, oferecendo estabilidade ao modelo. De acordo com USACE (2014), essa condição é dada pela equação 26.

$$C = V_w \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (26)$$

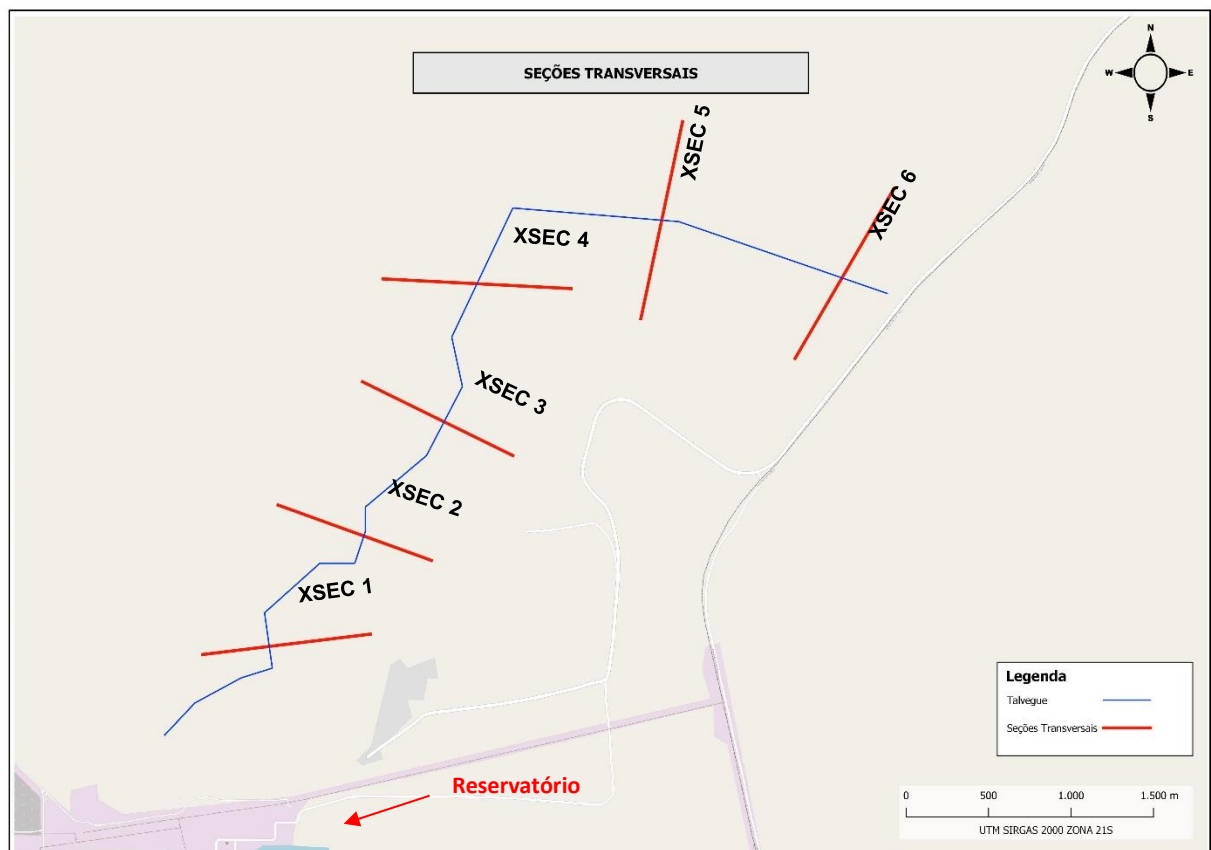
Em que,

- C consiste no número de Courant (adimensional);
- V_w é a velocidade da onda (m/s);
- Δt consiste no intervalo de tempo (s);
- Δx consiste no espaçamento entre duas seções transversais.

4.2.2.9 Seções transversais

Visando análise comparativa dos resultados obtidos, foram traçadas seis seções transversais ao longo do rio a jusante do reservatório com o intuito de obter os resultados de valores de nível de água com rejeito e velocidade de escoamento para cada modelo. As seções foram traçadas sem critérios específicos, porém com a mesma localização em ambos os modelos para fins comparativos. A Figura 42 apresenta as seções escolhidas.

Figura 42 - Seções transversais utilizadas na análise comparativa.



Fonte: A Autora (2023).

Foram escolhidas as seções 2 e 6 para obtenção dos parâmetros de nível de água com rejeito e velocidade de escoamento para ambos os modelos, HEC-RAS 2D e RiverFlow2D. A Seção 2 encontra-se a 2 km do reservatório, enquanto que a Seção 6 encontra-se a 4,8 km, aproximadamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realização das simulações, foram obtidos os resultados das modelagens nos softwares HEC-HMS, HEC-RAS 2D e RiverFlow2D, os quais serão apresentados neste capítulo.

Ressalta-se que os resultados obtidos serão apresentados conforme objetivo principal do presente trabalho, em que será apresentado e discutido a comparação dos resultados da ruptura do reservatório de estudo nos programas HEC-RAS 2D e RiverFlow2D. Nesse sentido, foram traçadas seis seções transversais nos modelos, com o intuito de avaliar, em determinadas seções, parâmetros de velocidade de escoamento e nível de água com rejeito. Além disso, também serão avaliadas as manchas de inundação obtidas e suas respectivas áreas de abrangência.

5.1 TRÂNSITO DE CHEIAS

De acordo com as metodologias utilizadas e mencionadas no item 4.2.1.1.1, foi possível obter os resultados acerca do trânsito de cheias para todas as durações considerando a Precipitação Máxima Provável (PMP). Os resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados do trânsito de cheias para o reservatório de estudo para PMP.

Duração	Precipitação (mm)	Vazão Afluente (m³/s)	Vazão Defluente (m³/s)	NA máx (m)	Borda Livre (m)
20 minutos	62,7	9,510	4,522	198,087	3,91
30 minutos	81,6	12,654	4,969	198,177	3,82
1 hora	127,6	15,273	6,029	198,389	3,61
2 horas	172,3	17,411	6,638	198,508	3,49
3 horas	199,6	16,714	6,701	198,517	3,48
4 horas	223,2	15,526	6,712	198,519	3,48
6 horas	249,5	12,483	6,560	198,496	3,50
8 horas	270,6	11,199	6,240	198,432	3,56
10 horas	284,4	9,774	5,892	198,362	3,63
12 horas	296,1	8,522	5,601	198,303	3,69
14 horas	306,2	8,341	5,312	198,245	3,75
24 horas	342,1	5,715	4,546	198,092	3,90
2 dias	346,2	2,916	2,908	197,760	4,24
3 dias	374,8	2,105	2,105	197,597	4,40
4 dias	431,5	1,818	1,818	197,538	4,46

Duração	Precipitação (mm)	Vazão Afluente (m³/s)	Vazão Defluente (m³/s)	NA máx (m)	Borda Livre (m)
5 dias	509,9	1,718	1,718	197,518	4,48
7 dias	562,5	1,354	1,354	197,415	4,58
10 dias	643,7	1,084	1,085	197,333	4,66
15 dias	806,9	0,907	0,907	197,278	4,72
20 dias	940,3	0,792	0,793	197,243	4,75
25 dias	1060,0	0,714	0,715	197,219	4,78
30 dias	1189,0	0,668	0,668	197,205	4,79
45 dias	1568,0	0,587	0,588	197,180	4,82
60 dias	1982,0	0,557	0,557	197,171	4,82
90 dias	2711,0	0,508	0,508	197,156	4,84
120 dias	3399,0	0,477	0,478	197,146	4,85
150 dias	3896,0	0,438	0,438	197,134	4,86
180 dias	4454,0	0,417	0,417	197,128	4,87

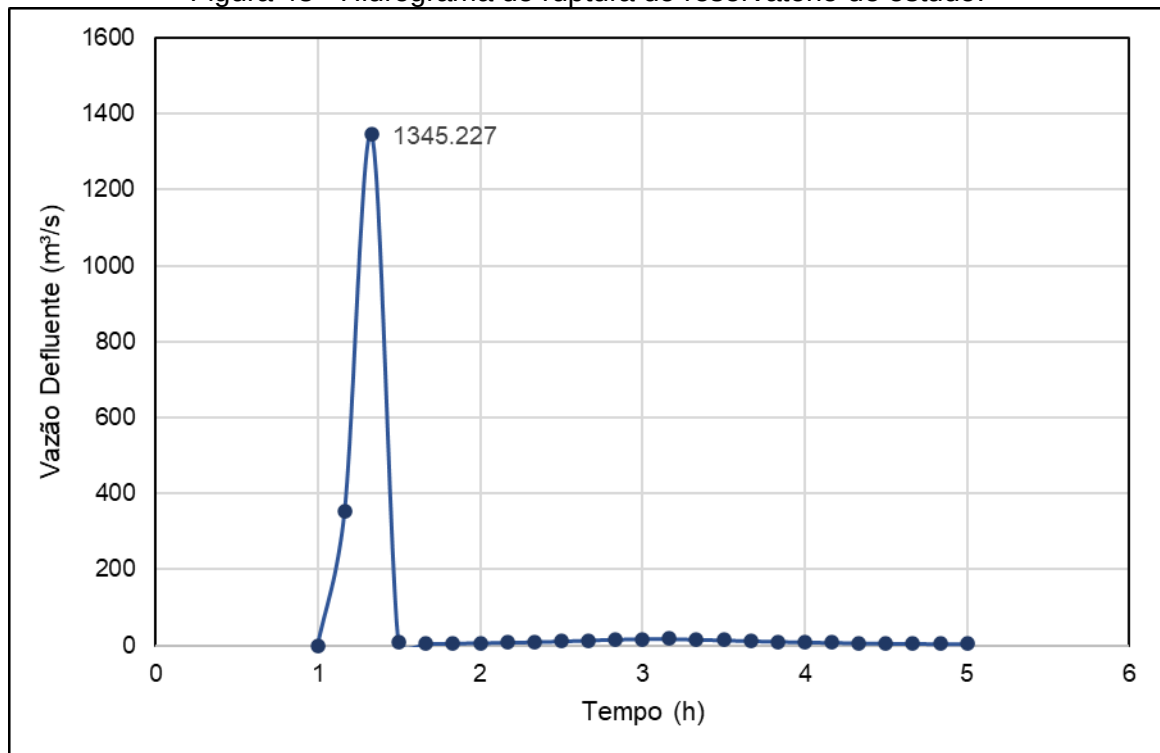
Fonte: A Autora (2023).

Nota-se que a duração crítica para o evento de PMP foi de 4 horas, com vazão defluente de 6,712 m, NA Máximo Maximorum de 198,52 m e borda livre remanescente de 3,48 m, estando de acordo com a recomendação de Pinheiro (2011) para barragens de mineração, conforme o item 4.2.1.1.1.6.

5.2 HIDROGRAMA DE RUPTURA

O hidrograma de ruptura consiste na distribuição do volume mobilizado de rejeitos ao longo do tempo após o rompimento, a qual depende da geometria da brecha considerada no modelo. O hidrograma de ruptura obtido através da modelagem da ruptura do reservatório de estudo no software HEC-HMS encontra-se na Figura 43.

Figura 43 - Hidrograma de ruptura do reservatório de estudo.



Fonte: A Autora (2023).

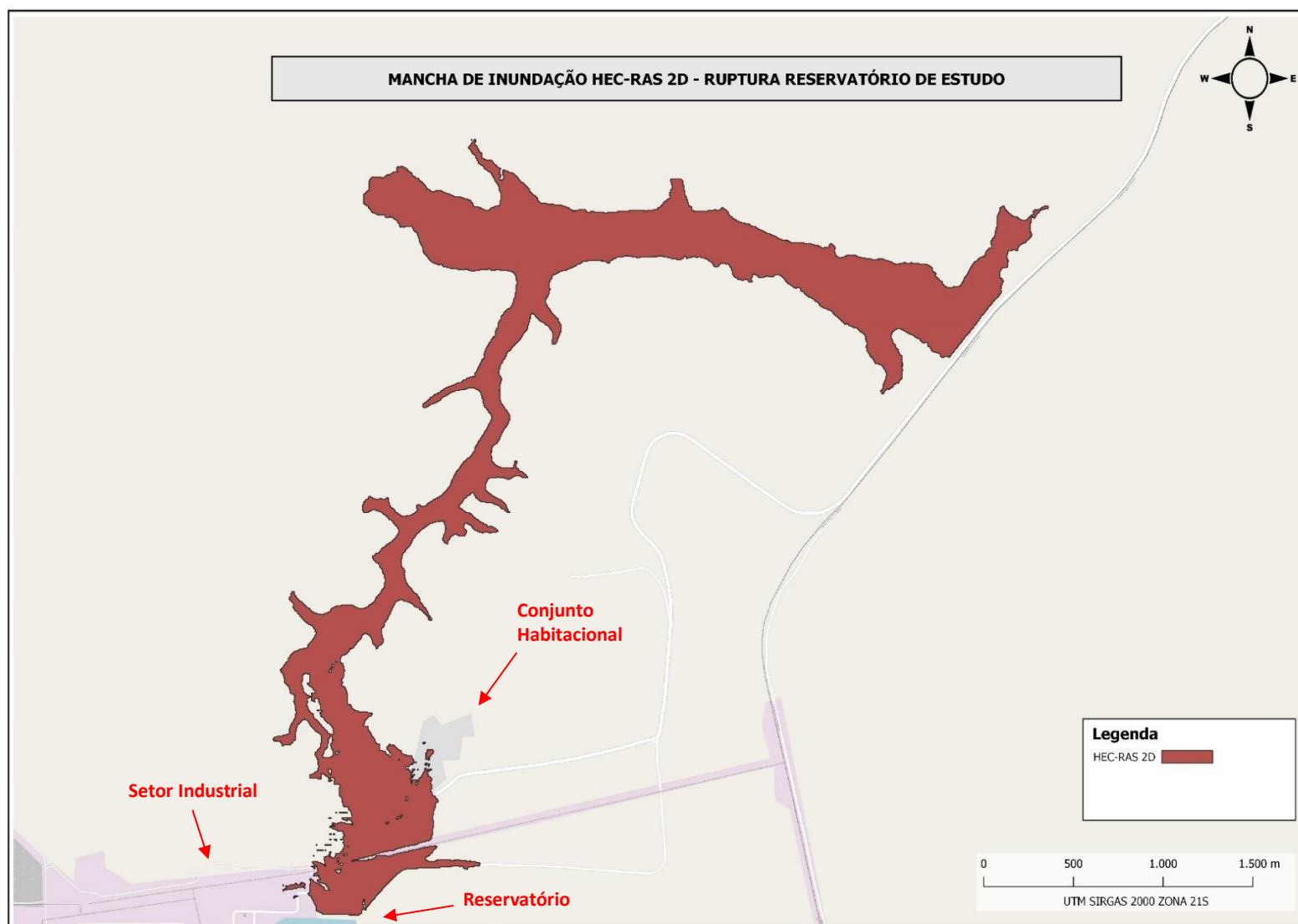
Conforme o gráfico da Figura 43 acima, a vazão de pico é igual a 1.345,227 m³/s e ocorre no tempo 1,33 h, ou seja, 20 minutos após a ruptura do reservatório.

5.3 MANCHAS DE INUNDAÇÃO

A análise comparativa acerca dos resultados obtidos nos dois softwares utilizados foi possível devido a adoção dos mesmos dados de entrada nos dois modelos. Considerando o período de 72 h de simulação, a mancha máxima obtida nos dois softwares estão apresentadas na Figura 44 e na Figura 45. Já a Tabela 12 apresenta os resultados comparativos obtidos em cada mancha (Figura 46).

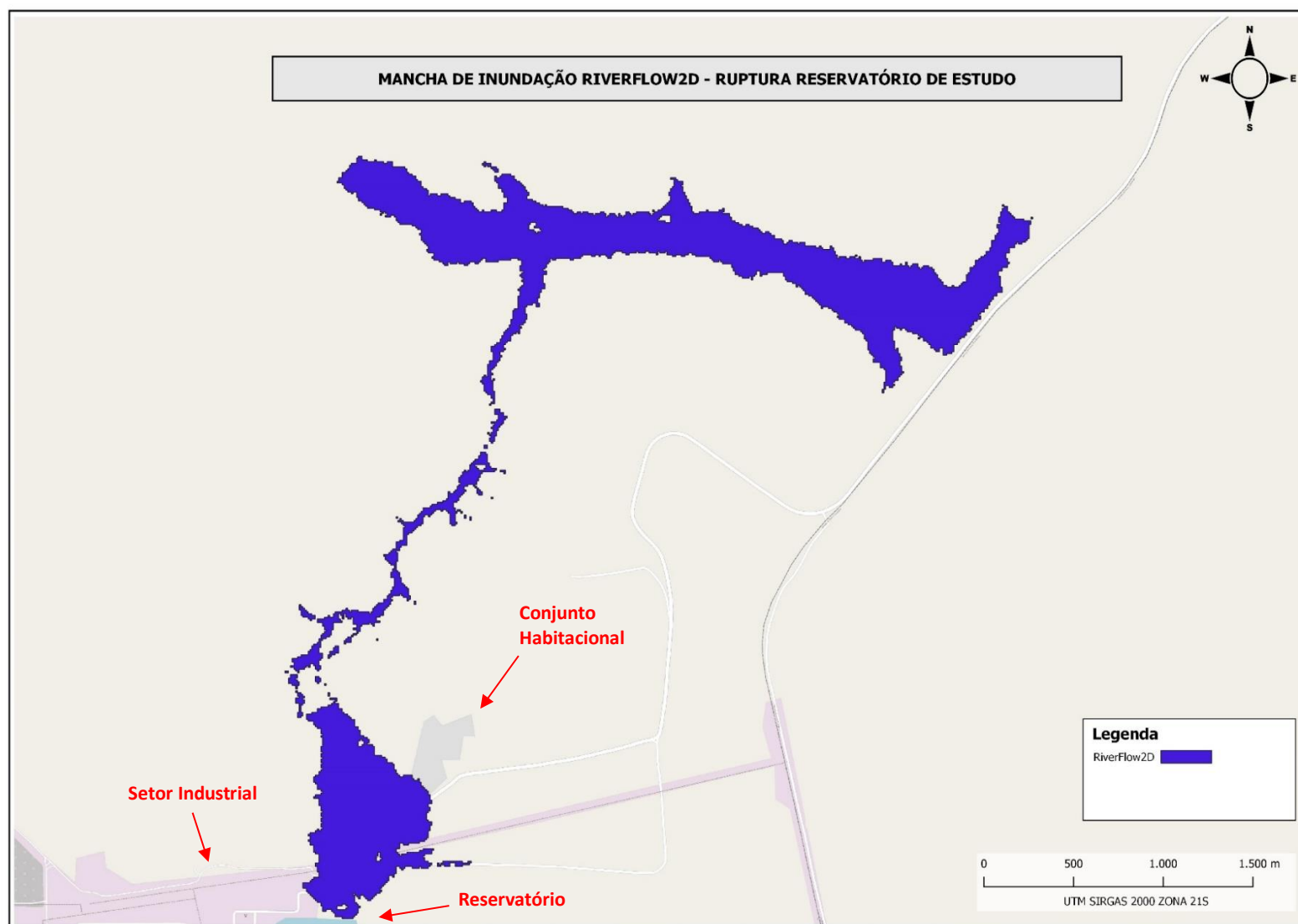
Vale ressaltar a presença de um setor industrial e de um conjunto habitacional localizados a jusante do reservatório. Ambas as estruturas foram afetadas pelas manchas de inundação. A Tabela 12 também apresenta a porcentagem das estruturas afetadas por cada mancha.

Figura 44 - Mancha de inundação do reservatório de estudo - HEC-RAS 2D.



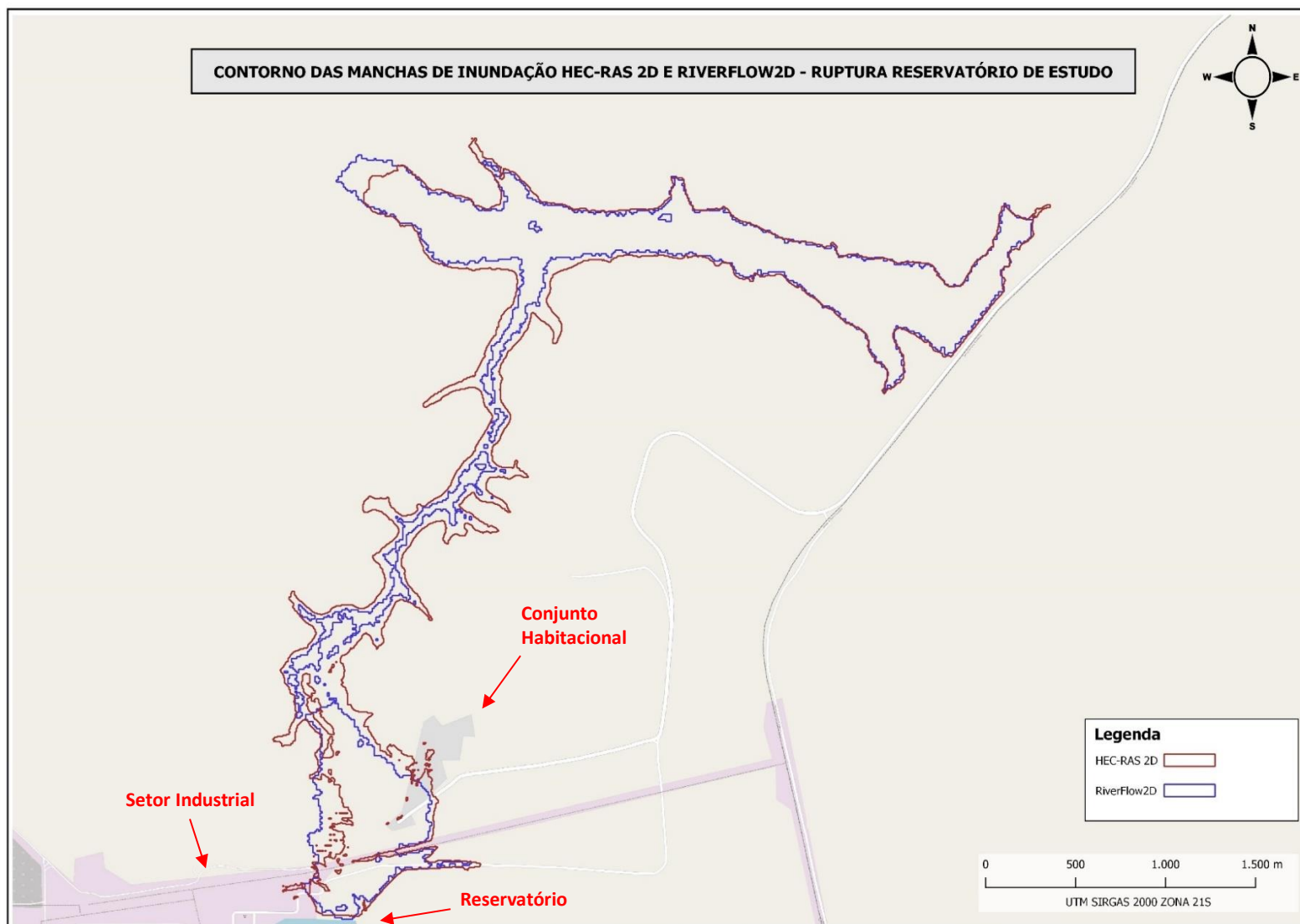
Fonte: A Autora (2023).

Figura 45 - Mancha de inundação do reservatório de estudo - RiverFlow2D.



Fonte: A Autora (2023).

Figura 46 - Contorno das manchas de inundação - HEC-RAS 2D e RiverFlow2D.



Fonte: A Autora (2023).

Tabela 12 - Parâmetros comparativos das manchas de inundação – HEC-RAS 2D e RiverFlow2D.

Mancha	Extensão da Mancha (km)	Área da Mancha (km²)	Área de Abrangência do Setor Industrial (%)	Área de Abrangência do Conjunto Habitacional (%)
HEC-RAS 2D	7,71	2,37	5,55	21,52
RiverFlow2D	7,92	1,90	5,64	14,00

Fonte: A Autora (2023).

De acordo com a Tabela 12, assim como as figuras apresentadas acima, é possível perceber a similaridade dos resultados comparativos advindos das manchas de inundação do HEC-RAS 2D e RiverFlow2D, tendo sido obtidos extensão da mancha igual a 7,71 km, área da mancha igual a 2,37 km² e área de abrangência do setor industrial igual a 5,55% no HEC-RAS 2D. Já no RiverFlow2D, foram obtidos extensão da mancha igual a 7,91 km, área da mancha igual a 1,90 km² e área de abrangência do setor industrial igual a 5,64% no RiverFlow2D.

A similaridade obtida nos dois modelos bidimensionais ressalta a boa abordagem que os softwares oferecem para análises de ruptura hipotética, assim como observado também por Brandão (2019), autor do trabalho de análise comparativa entre modelos unidimensionais e bidimensionais utilizando os mesmos softwares deste trabalho. Brandão (2019) afirma que modelos bidimensionais apresentam valores próximos e menores que modelos unidimensionais.

No entanto, as áreas de abrangência do conjunto habitacional apresentaram valores distintos em cada mancha, tendo sido obtido 21,52% de abrangência no HEC-RAS 2D e 14,00% no RiverFlow2D. Tal fato pode ser avaliado a partir da representação da condição de contorno de montante, pois esse fator influencia na propagação da onda de cheia até uma determinada distância do ponto aplicado. Esse fato também é identificado no trabalho de Brandão (2019). Essa investigação e análise mais profunda pode ser tema de futuras pesquisas que venham a ter como base o presente trabalho.

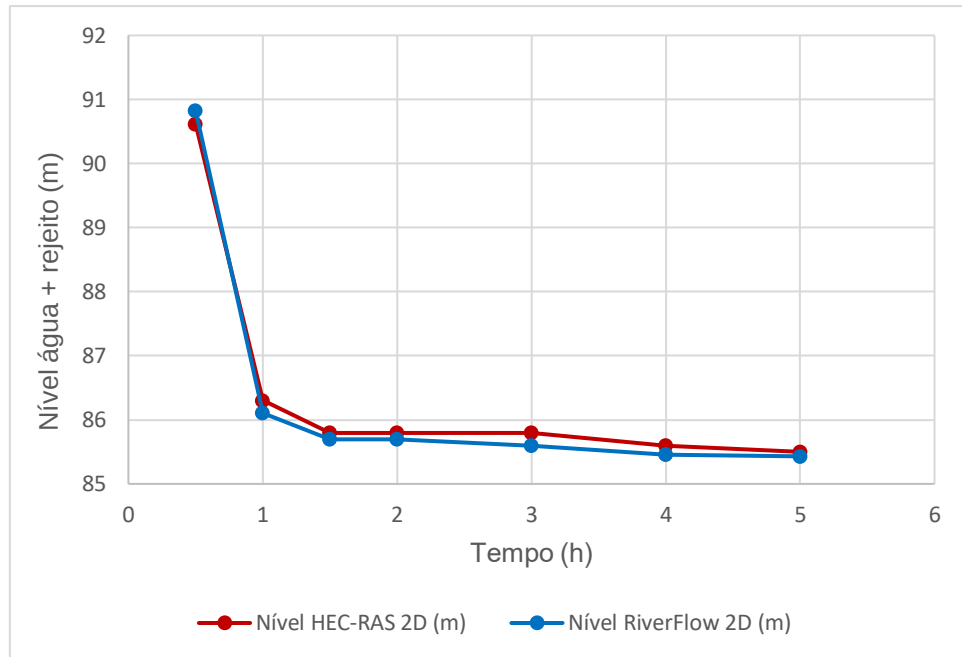
5.4 NÍVEL DE ÁGUA COM REJEITO E VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

Os resultados obtidos para os valores de nível de água com rejeito e velocidade de escoamento nas seções 2 e 6, conforme detalhado no item 4.2.2.9, estão apresentados a seguir.

- **Seção 2**

- Nível de água com rejeito

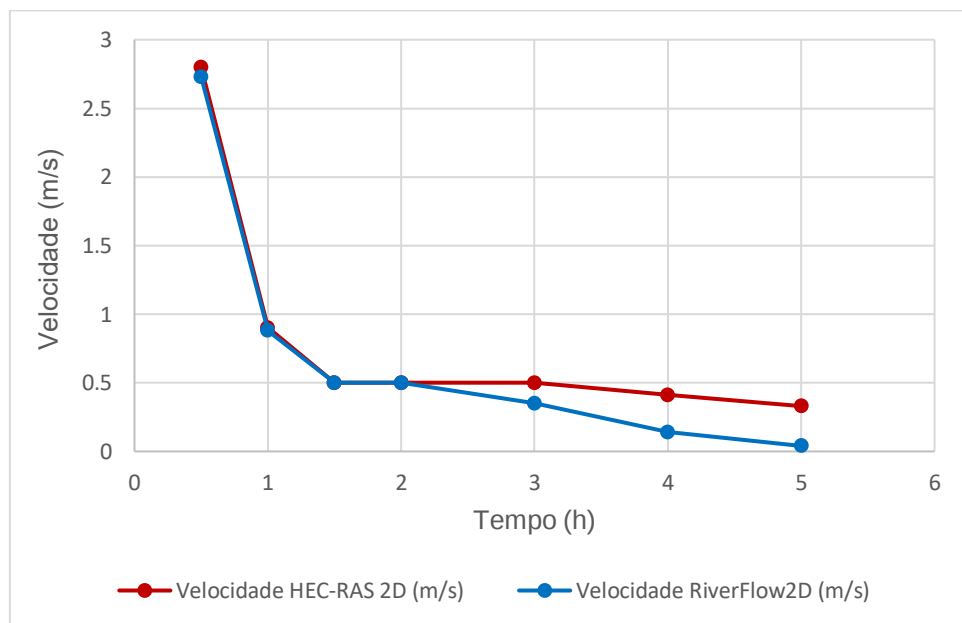
Figura 47 – Nível de água + rejeito para a Seção 2 ao longo do tempo.



Fonte: A Autora (2023).

- Velocidade de escoamento

Figura 48 – Velocidades de escoamento para a seção 2 ao longo do tempo.

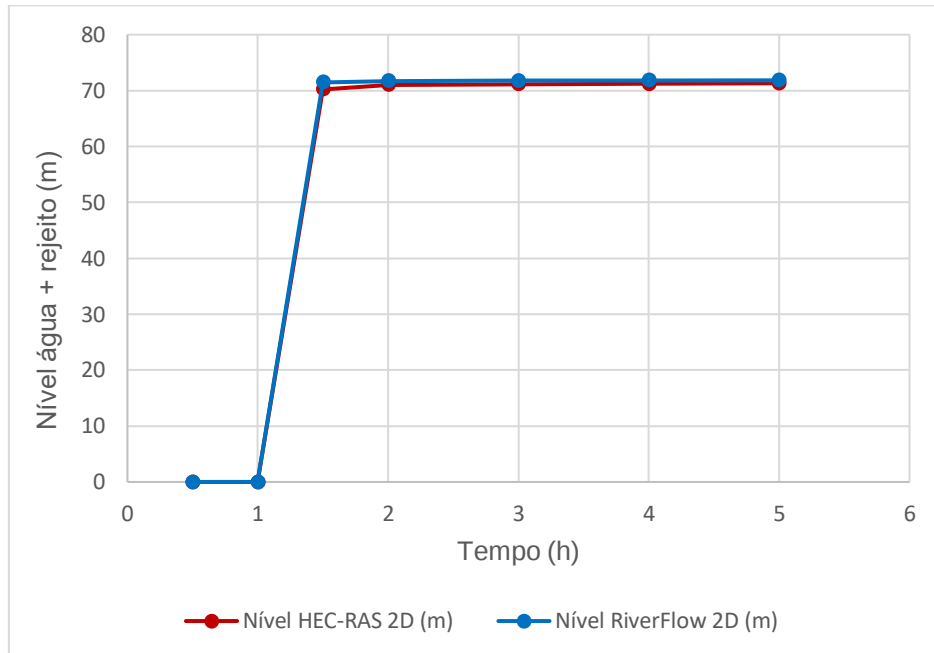


Fonte: A Autora (2023).

- **Seção 6**

- Nível de água com rejeito

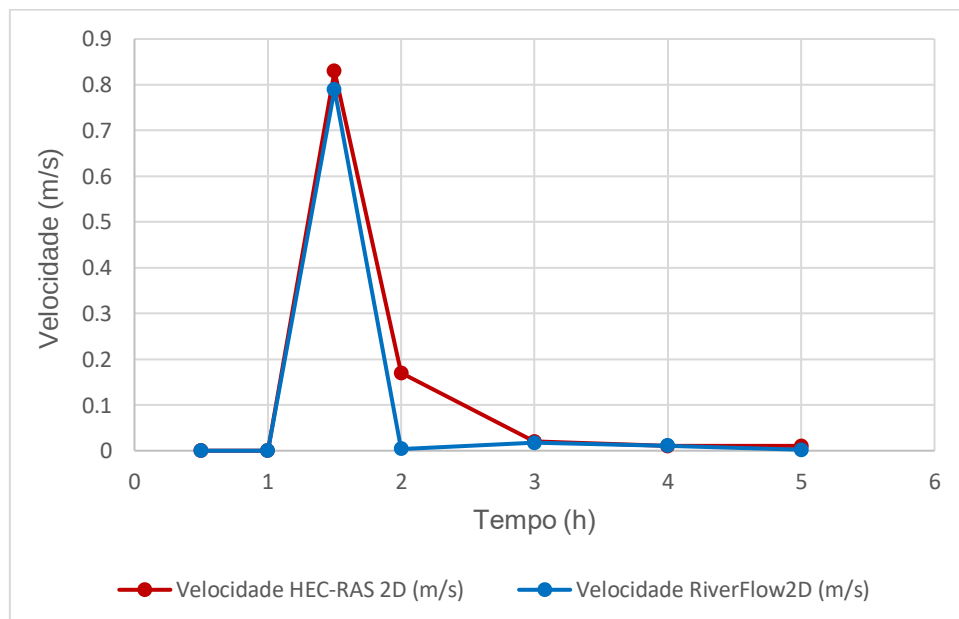
Figura 49 - Nível de água com rejeito para a seção 6 ao longo do tempo.



Fonte: A Autora (2023).

- Velocidade de escoamento

Figura 50 – Velocidades de escoamento para a seção 6 ao longo do tempo.



Fonte: A Autora (2023).

A partir dos resultados aferidos nas figuras acima, é possível perceber a similaridade dos valores de nível de água com rejeito e velocidade de escoamento para as duas seções analisadas nos dois modelos, HEC-RAS 2D e RiverFlow2D, assim como os resultados obtidos por Brandão (2019) para modelos bidimensionais utilizando os mesmos softwares.

Vale ressaltar que, para ambos os modelos, foi inserida a calha do rio, tendo como base o trabalho de Brandão (2019), assim como outros estudos, o qual afirma que a inserção da calha retrata a realidade, sendo um parâmetro de entrada de extrema importância, principalmente no que diz respeito à segurança da população localizada no vale a jusante. De acordo com o estudo, a inserção da calha do rio na modelagem de ruptura difere no tempo de chegada da onda de, aproximadamente, o dobro do tempo de chegada da onda no modelo em que não foi inserida a calha.

Ressalta-se que o tempo de chegada da onda, principalmente na população localizada logo a jusante do reservatório, denominada de Zona de Autossalvamento (ZAS), é um dos parâmetros essenciais para estabelecer as ações emergenciais contidas no Plano de Ação de Emergência (PAE), documento formal que define os procedimentos a serem seguidos em situações emergenciais em barragens, especialmente rupturas, e que depende do estudo de ruptura hipotética para ser elaborado.

6 CONCLUSÕES

No presente estudo foram realizadas as modelagens da ruptura hipotética do reservatório de estudo, através dos softwares HEC-RAS 2D e RiverFlow2D, alimentados com os mesmos parâmetros de entrada e condições de contorno, objetivando a realização de uma análise comparativa dos resultados obtidos em ambos os programas.

A cota gatilho do rompimento do reservatório de estudo foi obtida igual a 198,52 m a partir do estudo de trânsito de cheias. Posteriormente, essa cota foi modificada para 201,00 m visto que a chuva de projeto não gerou em contribuições significativas suficientes para acionar o gatilho da ruptura.

No tocante ao hidrograma de ruptura, foi obtida uma vazão de pico de 1.345,23 m³/s, a qual foi atingida após 20 minutos (1,33 h) do rompimento do reservatório.

Em relação aos resultados das manchas de inundação, estas apresentaram semelhanças, inclusive em termos de extensão e área da mancha, e área de abrangência do setor industrial, conforme apresentado neste estudo. Além disso, os parâmetros de nível de água com rejeito e velocidade de escoamento obtidos em duas seções da área de estudo também apresentaram resultados bastante semelhantes. Portanto, pode-se afirmar que ambos os softwares oferecem bom desempenho para simulações de rupturas hipotéticas em barragens de rejeito.

No entanto, vale destacar que os resultados das manchas de ambos os modelos obtidos para área de abrangência do conjunto habitacional não foram totalmente coincidentes. Conforme mencionado neste estudo, a literatura aponta que um possível fator causador da diferença pode ser na representação da condição de contorno de montante que tem influência na propagação da onda de cheia até uma determinada distância do ponto de aplicação. Portanto, é recomendado que, para estudos posteriores que venham utilizar este como base, ou até estudos que possuam uma população mais significativa no vale a jusante, sejam aplicados modelos mais precisos no tocante a representação da condição de contorno de montante e da brecha, com o intuito de diminuir essas incertezas.

Também vale ressaltar que a utilização de valores únicos para os parâmetros reológicos, como viscosidade e tensão de escoamento, pode contribuir para as incertezas dos modelos, sendo sugerido estudos aprofundados para fins de

avaliação de resultados comparativos.

Ainda diante da análise descrita nos parágrafos anteriores, os modelos possuem boa representatividade para simulação de uma ruptura hipotética em barragens de rejeito, pois ambas as manchas atingiram locais que possuíam pessoas trabalhando e/ou residindo, caracterizando áreas vulneráveis e, portanto, que necessitariam de ações emergenciais independentemente dos percentuais de áreas atingidas.

Os resultados obtidos e apresentados anteriormente permitiram concluir que a análise comparativa convergiu para uma boa aproximação, permitindo uma validação de ambos os softwares. Vale ressaltar que o HEC-RAS 2D possui disponibilidade gratuita para os usuários, enquanto o RiverFlow2D possui um elevado custo para a obtenção da licença computacional, trazendo assim, dificuldades de acesso para os usuários. No entanto, como ponto positivo para o RiverFlow2D, cita-se a possibilidade de inserir um arquivo raster da calha do rio como dado de entrada, resultando em uma única simulação, ao contrário do HEC-RAS 2D, o qual necessita a inserção de um modelo para a calha do rio e outro para o rejeito, forçando o usuário a realizar duas simulações. Portanto, os tempos para desenvolvimento do modelo e para a simulação total no HEC-RAS 2D são maiores que no RiverFlow2D. Também vale destacar que o RiverFlow2D possui uma interface GIS, a qual permite o desenvolvimento do modelo e manipulação dos resultados, assim como elaboração de mapas representativos em um programa, como, por exemplo, o QGIS (software gratuito), trazendo maior facilidade e otimização na apresentação dos resultados, ao contrário do que ocorre com o HEC-RAS 2D, no qual é necessário realizar as extrações dos resultados, em seguida importá-los para o software QGIS para posteriormente desenvolver os mapas representativos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho permitiu avaliar os resultados obtidos em um estudo de ruptura hipotética realizado em dois modelos bidimensionais, HEC-RAS 2D e RiverFlow2D, através de ferramentas computacionais, modelagem hidrodinâmica, além de critérios e premissas adotadas.

A análise comparativa foi possível devido a inserção dos mesmos parâmetros nos dois modelos, ressaltando o diferencial deste trabalho, uma vez que pouco se tem disponível publicações com essa abordagem, especificamente para barragens de rejeito, apesar da existência de estudos com o tema de ruptura hipotética.

Outro ponto importante e que traz elevado grau de importância à presente pesquisa é o tema. Os recentes acontecimentos envolvendo rupturas de barragens de rejeito, resultados em inúmeras perdas sociais, ambientais e prejuízos econômicos, principalmente o acontecimento em Brumadinho em 2019, elevou a preocupação acerca da segurança dessas estruturas e da população potencialmente afetada. A Lei nº 14.066 (Brasil, 2020), de setembro de 2020, a qual altera a Lei nº 12.334 (Brasil, 2010), de setembro de 2010 e estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), confere esse entendimento.

Portanto, os pontos abordados nos parágrafos anteriores contribuíram para a motivação da escolha do tema e realização do trabalho apresentado, em conjunto com o entendimento que a área de mineração encontra-se em alta relevância e a possibilidade de desenvolver diversos outros trabalhos utilizando este como base.

Vale destacar que procedimentos emergenciais são estabelecidos em planos de ação de emergência, documentos formais elaborados a partir dos resultados obtidos no estudo de ruptura hipotética. Portanto, em casos de situações que venham a por em risco a estrutura, especificamente um rompimento, a população residente no vale a jusante, denominado de Zona de Autossalvamento (ZAS), deve seguir tais procedimentos. Diante disso, é recomendado que para fins de elaboração desses planos sejam utilizadas metodologias, critérios e premissas mais conservadores, visando estabelecer os procedimentos mais adequados e voltados para a segurança da população existente a jusante.

Por fim, o presente trabalho oferece potenciais contribuições para estudos futuros, dos quais é possível mencionar:

- Desenvolvimento de pesquisas voltadas a planos de ação de emergência;

- Elaboração de estudos reológicos considerando a variação espaço-temporal para aprofundamento da influência de parâmetros como viscosidade e tensão de escoamento na mancha de inundação;
- Estudos de ruptura com mais cenários de simulação;
- Elaboração de estudos de ruptura hipotética com a quantificação de infraestruturas possivelmente afetadas.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, P.C. 1987. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, Rio de Janeiro, pp.1-9.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Instruções para apresentação do plano de segurança da barragem** - PSB. Vol. I. Brasília: ANA, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília: ANM, 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-130-de-24-de-fevereiro-de-2023-466161726>. Acesso em: 13 out. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução Nº 130, de 24 de fevereiro de 2023**. Altera a Resolução ANM Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências. Brasília: ANM, 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>. Acesso em: 05 jun. 2022.
- ALBUQUERQUE FILHO, L. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeito de minério de ferro através de ensaios de piezocone. **Solos e Rochas**, v. 29, n. 3, p. 391-394, 2004.
- ARAUJO, A. C.; SOUZA, C. C.; AMARANTE, S. C.; 2003 apud OSORIO, C. A. H. Caracterização de pastas minerais. Dissertação de Mestrado (Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais), UFMG, Belo Horizonte. 2005.
- ARAUJO, A. C. S.; ANDRADE, M. P.; RIBEIRO, C. B. M.; CÂNDIDO, V. B. R.; MENDES, G. C.; MELO, T. T. R.; GANTE, L. G. A. Aplicação do Método de Puls no Amortecimento de Cheias – Carangola (MG). XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas e IV Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, 2022, Brasília, DF.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-13028**. Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BARNES, H. A.; HUTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Amsterdam: Elsevier Science, 1989, 199p.
- BERGER (2011). Estimation of Tailings Dam Break Discharges Arvind Dalpatram Workshop on Dam Break Analysis to Tailings Dams. USSD.
- BINGHAM, E. C. **Fluidity and plasticity**. New York: McGraw-Hill, 1922, 463p.
- BLIGHT, G. E. **Geotechnical engineering for mine waste storage facilities**. London: Taylor & Francis, 2010. 641 p.
- BOGER, D. V. Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. **Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**. 2013. p. 50-238.

BOULANGER, R. W.; IDRIS, I. M. 2004. State normalization of penetration resistance and the effect of overburden stress on liquefaction resistance. In Proceedings of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Berkeley, California, 7-9 January 2004. American Society of Civil Engineers, Reston. pp 484-491.

BRANDÃO, M. R. L. **Modelagem hidrodinâmica uni e bidimensional aplicada ao rompimento da Barragem do Fundão em Mariana/MG**. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal do Rio de Janeiro), UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.

BRASIL. **Resolução nº 4/2019, de 15 de fevereiro de 2019**. Dispõe sobre medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido. Brasília, 2019.

BRASIL. **Lei Federal nº 14.066, de 20 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>>. Acesso em: 05 junho 2022.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. 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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 05 junho 2022.

BRYANT, S. M.; DUNCAN, J. M.; and SEED, H. B. Application of tailings dam flow analyses to field conditions. Report UCB/GT/83-03, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California. 1983.

CARRARO, J. A. H.; BANDINI, P.; SALGADO, R. 2003. Liquefaction resistance of clean and non-plastic silty sands based on cone penetration resistance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE.

CASAGRANDE, A. 1975. Liquefaction and cyclic deformation of sands – a critical review. Proc. 5th Pan-American Conference, Argentina, pp. 81-133.

CASTRO, G. 1969. **Liquefaction of sand**. Ph.D. Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

CHOW, V. T. Runoff. In: CHOW, V. T. **Handbook of Applied Hydrology**. McGraw-Hill, 1964. Cap. 14, p. 1-54.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. **Guia básico de segurança de barragens**. São Paulo: CBGB, 1999.

DAVIES, M. P. "Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. In Proceedings Tailings and Mine Waste", Vancouver, BC, Canada, 9p. 2011.

MINERAÇÃO Usiminas adota nova tecnologia para dispor rejeitos. **Diário Popular**, 25 junho 2018. Disponível em: <http://www.diariopopularmg.com.br/mineracao-usiminas-adota-nova-tecnologia-para-dispor-rejeitos/>. Acesso em: 27 março 2022.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos da mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação de mestrado (Programa de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2008.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragem de rejeito construída por aterro hidráulico**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2000.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. **Federal guidelines for inundation mapping of flood risks associated with dam incidents and failures**. First Edition. FEMA, 2013. 946 p.

FREAD, D. L. Some existing capabilities and future directions for dam-breach modelling/flood routing. Proceedings FEMA Workshop on Issues, Resolutions, and Research Needs Related to Embankment Dam Failure Analysis. Oklahoma City, 2001.

FREIRE-NETO, J. P. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade**. Dissertação de mestrado (Departamento de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2009.

FROEHLICH, D. C.; TUFAIL, M. **Evaluation and use of embankment dam breach parameters and their uncertainties**, in proc., Dam Safety 2004, 21th Annual Conf. Of the Association of State Dam Safety Officials, ASDSO, Lexington, 2004.

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

GEOESTÁVEL. **Sistema de disposição de rejeitos**. GEOESTÁVEL, 2022. Disponível em: <https://geoestavel.com.br/servico/sistema-de-disposicao-de-rejeitos/>. Acesso em: 23 mar. 2022.

GIBSON, R. E.; ENGLAND, G. L. E HUSSEY, M. J. L. 1967. **The theory of one dimensional consolidation of saturated clays**. I. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers, *Géotechnique*, 17, pp. 261-273.

GLOBO G1. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/antes-e-depois-veja-imagens-do-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg.ghtml>>. Acesso em: 19 junho 2023.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de**

minério de ferro. Dissertação de Mestrado (Escola de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2009.

GONÇALVES, M. O. **Análise comparativa entre modelo reduzido e modelos computacionais uni e bidimensionais.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - PPGERHA) - Universidade Federal do Paraná, Paraná. 2017.

GUILLÉN, J. L. C. **Estudo de modelos constitutivos para previsão da liquefação em solos sob carregamento monotônico.** Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 136p. 2004.

Hydronia, LLC. RiverFlow2D, Two-Dimensional River Dynamics Model – Reference Manual. Janeiro, 2016a.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira.** IBRAM, 2020. Disponível em: <<https://ibram.org.br/release/setor-mineral-tem-incremento-positivo-em-quase-todos-os-indicadores-no-3o-trimestre/>>. Acesso em: 19 junho 2021.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Informações sobre a economia mineral brasileira. IBRAM, 2019. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006389.pdf>>. Acesso em: 21 novembro 2021.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Mineração em números – Dados econômicos trimestrais.** IBRAM, 2022. Disponível em: <<https://ibram.org.br/mineracao-em-numeros/>>. Acesso em: 23 março 2022.

ICOLD – **International Commission on Large Dams. Lessons from Dam Incidents.** Paris, Reduced Editions, 1973.

ICOLD – **International Commission on Large Dams. Dam Failures Statistical Analysis.** Paris: UNEP/ICOLD, Bulletin 99, 1995.

ICOLD – **International Commission on Large Dams. Tailing dams risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences.** Bulletin 121.144 p. Paris, 2001.

JEYAPALAN, J. K.; DUNCAN, J. M.; SEED, H. B. **Investigation of Flow Failures of tailings dams.** Journal of Geotechnical Engineering, Reston, v. 109, n. 2. p-172-189. 1983.

KUPPER, A. M. A. G. 1991. Design of Hydraulic Fill. PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 525 p.

KYNCH, G. J. 1952. **A theory of sedimentation.** Trans., Faraday Soc., 48, pp 166-176.

LARA, J. L.; PORNILLOS, E. U.; MUÑOZ, H. E. 2013. **Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application for dry stacking tailings deposits – state-of-the-art,** in R Jewell, AB Fourie, J Caldwell & J Pimenta (eds),

Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 249-260.

LANDRIAULT, D. 2002. **The surface disposal of industrial waste: slurry placement v/s high density slurry placement v/s placement as a paste**. In: High Density & Paste Seminar. Santiago, Chile.

LIU, J. C. And ZNIDARCIC, D. 1991. **“Modelling 1-D compression characteristics of soils.”** J. Of geotech. Engrg. Div., ASCE, vol.117, N° 1, 162-169.

LOZANO, A. F. E. **“Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica”**. Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. 2006.

MACHADO, N. C. **“Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do Fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação”**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. 2017.

MARSHALL, J. **Rompimentos de barragens de rejeitos no Brasil e no Canadá: uma análise do comportamento corporativo**. Caderno Eletrônico de Ciências Sociais, v.5, n.1, p. 27-46, 2017.

MATOS, A. C. S.; ELEUTÉRIO, J. C. **Análise de perdas de vidas associadas à ruptura hipotética da Barragem do Fundão**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu – PR, 1-10, nov, 2019.

METSO OUTOTEC. **Redução de custos e economia de água com as novas bombas para minério de ferro em Itaminas**. METSO OUTOTEC, 2017. Disponível em: <<https://www.mogroup.com/pt/insights/blog/mineracao-e-metais/reducao-de-custos-e-economia-de-agua-com-as-novas-bombas-para-minerio-de-ferro/>>. Acesso em: 03 abril 2022.

MORGADO, R. G. P. **Estudo das causas de ruptura de barragens de rejeito de mineração no Brasil e proposta para avaliação da operação**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos. 2022.

MOTA, K. R. R. **Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG/UFU**, PPGECC, Maio de 2017.

MOURA, A. C. M. B.; JÚNIOR, A. P. M.; COTA, G. E. M.; REIS, M. O. **Panorama dos rompimentos de barragens de rejeito de minério no mundo**. Caderno de Geografia, v.30, n.61, 24 p, 2020.

NASCIMENTO, C. R. **Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais**. Série Rochas e minerais industriais, CETEM/MCT. Rio de Janeiro, RJ, 53p. 2008.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. 1985 apud MELO, L. P. R. **Physical properties and**

mechanics of hyperconcentrated sediment flows. In: SPECIALTY CONFERENCE – DELINEATION OF LANDSLIDE, FLASH FLOOD AND DEBRIS FLOW HAZARDS IN UTAH, 1984, Logan, Utah State University, p. 260-279.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. **Laboratory analysis of mudflow properties.** Journal of hydraulic engineering, vol. 114, nº8, 1988, p. 877-887.

PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração.** Porto Alegre: ABRH, 2011.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte. 2013.

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

RIBEIRO, V. Q. F.; VILLAR, L. F.S.; SIMÕES, D. F. **Proposta de metodologia para previsão do volume mobilizado em rupturas de estruturas de disposição de rejeitos.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG, 7p. 2016.

RICO, M.; BENITO, G.; SALGUEIRO, A. R.; DÍEZ-HERRERO, A.; PEREIRA, H. G. 2008. **Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context.** Journal of Hazardous Materials. ScienceDirect. Elsevier. 846-852 p.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

SALFATE, E. R. 2011. **Predicting Void Ratio for Surface Paste Tailings Deposited in Thin Layers.** Master of Science Thesis. The Faculty of Graduate Studies (Mining) The University of British Columbia. 127p.

SANTOS, F. F. G. **Análise da disposição de rejeitos sob a forma de pasta.** Monografia – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, p. 37. 2012.

SANTOS, L. F.; CHARGEL, L. T.; HORA, M. A. G. M. **Simulação do Rompimento da Barragem de Juturnaíba.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro, Vol. 42-3, p. 299-310, julho, 2019.

SAVAGE, W. Z.; BAUM, R. L.; WASOWSKI, J. 2003. **Mechanics of Earth Flows.** 8p.

SILVA, W. P. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001).**

Dissertação de Mestrado (Escola de Minas/UFOP) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2010.

SOARES, L. **“Barragem de Rejeitos”**. Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 19 – pág. 831-896. CETEM (Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia). COPM (Coordenação de Processos Minerais). 2010.

SOMOGYI, F. 1979. **Analysis and prediction of phosphatic clay consolidation: implementation package**. Technical Report, Florida Phosphatic Clay Research Project, Lakeland, Fla.

STARK, T. D.; OLSON, S. M.; KRAMER, S. L.; YOUL, T. L. 1998. **Shear strength of liquefied soils**. Proc., Workshop on post-liquefaction shear strength of granular soils, April 17-18, 1997, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 288 p.

TANNER, R. I. **Engineering Rheology**. Ed. Rev. New York: Oxford University Press. 451p. 1988.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MERSI, G. 1996. **Soil mechanics in engineering practice**, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 549 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**, 2ª ed. Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS: ABRH, 2001. 943 p.

USACE - US Army Corps of Engineers. Using HEC-RAS for dam break studies – TD-39, Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2014.

USACE - US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. HEC-HMS Versão 4.9. Estados Unidos, 1989.

USACE - US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Manual HEC-RAS Versão 6.2. Estados Unidos, 2022.

VALE. **Importância da mineração para a economia do país**. VALE, 2017. Disponível em: < <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/qual-a-importancia-da-mineracao-para-a-economia-do-pais.aspx>>. Acesso em: 23 março 2022.

VERÓL, A. P.; **Simulação da propagação de onda recorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2010.

VICK, S. G. 1983. **Planning, design, and analysis of tailing dams**. John Wiley & Sons, New York, USA. 369 p.

VICK, S. G. **Analyses of flow failures of mine tailings dams and investigation of flow failures of tailings dams**. Journal of Geotechnical Engineering, v.110, p. 454-456, 1984.

WISE URANIUM PROJECT. **Chronology of major tailings dam failures**.

Disponível em: <<https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acesso em: 07 de abril 2022.