



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS –
UNIDADE ARAXÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL**

KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO

**MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA
BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES
MODELOS HIDRODINÂMICOS**

**ARAXÁ-MINAS GERAIS
2024**

KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO

**MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA
DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE
FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS**

Dissertação apresentada à banca de mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas – Mestrado Profissional, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Unidade Araxá, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof^a. Dra. Hersília de Andrade e Santos
Co-orientadora: Dra. Rafaela Baldi Fernandes

**ARAXÁ-MINAS GERAIS
2024**

ATA DA 33ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 24 (vinte e quatro) dias do mês de junho do ano de 2024 (dois mil e vinte três), às 14h30min (quatorze horas e trinta minutos), através da Plataforma RNP com transmissão via youtube pelo link https://youtube.com/live/IUKHZYA_qAw?feature=share, foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação da Mestranda Karina Salatiel do Nascimento, *sob a forma totalmente remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020)*, sendo a banca examinadora composta pela Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos (Presidente) – CEFET- MG, Dra. Rafaela Baldi Fernandes (Co-orientadora) - Instituto Brasil, Dr. Adonai Gomes Fineza (Membro externo) – Kráton Engenharia Ltda e Prof. Dr. Mario Guimaraes Junior (Membro interno) – CEFET-MG/PPGEMIN.

Dando início aos trabalhos a Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu a Mestranda **Karina Salatiel do Nascimento**, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS", na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa *Processamento de Minério e Rejeitos*. Terminada a exposição, a Presidente da Banca examinadora passou a arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, a Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que a Mestranda foi aprovada com recomendações, por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pela Mestranda.

Araxá, 24 de junho de 2024

Assinatura via SIPAC na Página Seguinte

Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos

Presidente (CEFET-MG)

Dra. Rafaela Baldi Fernandes

Co-orientadora (Instituto Brasil)

Dr. Adonai Gomes Fineza

Membro externo (Kráton Engenharia Ltda)

Assinatura via SIPAC na Página Seguinte

Prof. Dr. Mario Guimaraes Junior

Membro interno (CEFET-MG/PPGEMIN)

Assinatura via SIPAC na Página Seguinte

Eng^a. Karina Salatiel do Nascimento

Discente



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO N° 10/2024 - PPGE (11.52.06)

(N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 04/07/2024 16:40)

HERSILIA DE ANDRADE E SANTOS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
PPGE (11.52.06)
Matrícula: ###049#6

(Assinado digitalmente em 04/07/2024 22:12)

MARIO GUIMARAES JUNIOR
COORDENADOR
PPGEMIN (11.52.17)
Matrícula: ###395#8

(Assinado digitalmente em 04/07/2024 17:23)

KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
DISCENTE
Matrícula: 2021#####0

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **10**, ano: **2024**, tipo:
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de emissão: **04/07/2024** e o código de verificação: **139fa747e8**

Nascimento, Karina Salatiel.
N244m Mancha de inundação associada à ruptura hipotética de uma
barragem de rejeitos: análises do tipo de fluido e diferentes modelos
hidrodinâmicos / Karina Salatiel Nascimento. – 2024.
142 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos.
Coorientadora: Dra. Rafaela Baldi Fernandes.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Minas, Araxá, 2024.
Bibliografia.

1. Barragens de rejeitos – Teses. 2. Rejeitos de minérios – Teses.
3. Hidrogramas de ruptura – Teses. 4. Reologia dos fluidos – Teses. I.
Santos, Hersília de Andrade e. II. Fernandes, Rafaela Baldi. III. Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 624.136

Dedico essa dissertação aos meus avós Nézia e Joaquim, por me amarem mesmo antes da minha existência e por nunca medir esforços para me ver feliz. À minha mãe Sílvia e minha tia Silvana, que sempre me incentivaram e são meus exemplos de coragem, força e humildade. Dedico também ao meu noivo Arthur, pela compreensão em todas as ausências e pela cumplicidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me sustentado até aqui. Por me dar forças para continuar e manter a minha fé de que com Ele tudo é possível.

Agradeço ao meu avô Joaquim, que me deu muito carinho e amor enquanto esteve presente. Infelizmente sua caminhada chegou ao fim e eu continuei minha viagem, porém sigo com ele no coração e com a certeza de que ele estaria orgulhoso do caminho que trilhei.

Agradeço a minha avó Nézia, que me ensinou a ter fé, moldou meu caráter, me deu amor e ora por mim dia e noite, incansavelmente. A pessoa que fez eu ser quem sou e me inspira. A senhora é a prova do cuidado de Deus por mim e sem a senhora eu nada seria.

Agradeço a minha mãe por ter sido a maior admiradora em todas as minhas conquistas e meu apoio nas derrotas. Você é meu maior exemplo de força e determinação. Tudo que eu conseguir conquistar é por você e para você!

A minha tia Silvana, por me ajudar em todas as adversidades que encontrei no caminho. Te agradeço por sempre estar presente na minha vida, por acreditar no meu trabalho e por me incentivar sempre.

Ao meu noivo Arthur, por toda a compreensão, amor, cumplicidade e paciência. Quando me faltou o chão, você me mostrou que eu era capaz de voar. Obrigada por ser parte de tudo aquilo que eu nem imaginava alcançar.

Agradeço a Rafaela, por estar presente em todas as minhas conquistas, por compartilhar seu conhecimento e experiências com tanta generosidade. Obrigada pela amizade e por contribuir com a profissional que me tornei.

Agradeço ao CEFET pela oportunidade, em especial ao professor Mário, por me receber de braços abertos, por me encorajar e estar sempre disposto a me ajudar. A Hersilia, pela orientação, incentivo, ensinamentos e pelo apoio.

Agradeço à equipe da HR Wallingford, em especial ao Nilton Valentim, Mohammed Hassan e Gregor Petkovsek, por abraçarem a minha ideia e me ajudar durante todo o processo mesmo com as limitações geográficas e do idioma. Agradeço também pela atenção e o tempo que dedicaram à minha ideia; e por fornecerem gratuitamente o software para desenvolvimento do estudo.

Aos amigos e colegas que me ajudaram direta ou indiretamente, em especial ao Patrick por se fazer presente em todas as minhas dificuldades e tornar meu fardo mais leve.

A todas as pessoas que, embora não citados nominalmente, de alguma forma fizeram parte deste trabalho.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcuta)

“Se você se concentrar em algo, poderá fazer qualquer coisa.”

(Madara Uchiha).

RESUMO

As imprecisões acerca da mancha de inundação gerada nos estudos de *dam break* de barragens de mineração estão associadas à fatores como a classificação reológica dos fluidos e o coeficiente de rugosidade. A taxa de deformação e a tensão de cisalhamento dos rejeitos de mineração não são constantes e a viscosidade das lamas contendo esses rejeitos pode ser viscoelástica, dependente ou independente do tempo, comportamento característico de fluidos não-newtonianos. A complexidade das características geotécnicas e hidráulicas desse material, impõem aos modelos numéricos de *dam break* um desafio relacionado às características que se deve considerar nos *softwares* disponíveis para tais fins. Esse trabalho objetiva realizar uma análise estatística da influência do tipo de fluido considerado no escoamento de uma ruptura hipotética de barragem, em função do coeficiente de rugosidade (n), caracterizando suas incertezas a partir da delimitação da área de mancha de inundação, profundidade máxima, tempo de chegada e velocidade do escoamento. Para isso, uma análise descritiva entre os hidrogramas de ruptura gerados por duas ferramentas distintas, EMBREA-MUD e HEC HMS, foi produzida. A partir destes hidrogramas avaliou-se, o modelo hidrodinâmico bidimensional do fluxo de lama não-newtoniano e newtoniano, a partir do *software* HEC-RAS 6.3.1. Para isso, foram simulados três cenários: o primeiro, alicerçado na propagação típica de água, com cenário newtoniano e coeficiente de *mannning* normal-médio; o segundo, embasado no aumento do coeficiente de *mannning* para um valor alto no vale de jusante (irreal) para assemelhar as características de fluidos não-newtonianos, e, o terceiro cenário, equivale à simulação do fluido não-newtoniano, que considera seu comportamento como plástico de Bingham, com parâmetros reológicos propostos na literatura e coeficiente de *mannning* normal-médio. Os resultados das simulações mostraram áreas de manchas de inundação e profundidades máximas semelhantes entre si, para o primeiro e terceiro cenário; entretanto o fluido não-newtoniano percorreu uma área transversal superior aos demais cenários, sendo os parâmetros velocidade e tempo de chegada, divergentes, com os dois últimos mais próximos entre os cenários 2 e 3. Além disso, o cenário 2 retratou maior propagação longitudinalmente, o que é preocupante em estudos cuja finalidade é delimitar a Zona de Autossalvamento (ZAS). Por fim, a pesquisa mostrou que em áreas de inclinação acentuada, o fluido não-newtoniano se moveu mais rápido que o fluido newtoniano, uma vez que o peso do fluxo, que atua como uma força adicional, favoreceu a aceleração.

Palavras-chave: coeficiente de *mannning*; fluidos não-newtonianos; tempo de chegada da onda.

ABSTRACT

Inaccuracies about the flood spot generated in dam break studies of mining dams are associated with factors such as the rheological classification of fluids and the roughness coefficient. The deformation rate and shear stress of mining tailings are not constant and the viscosity of the slurries containing these tailings can be viscoelastic, dependent or independent of time, a behavior characteristic of non-Newtonian fluids. The complexity of the geotechnical and hydraulic characteristics of this material imposes a challenge on numerical dam break models in terms of the characteristics that should be considered in the software available for these purposes. This work aims to carry out a statistical analysis of the influence of the type of fluid considered in the flow of a hypothetical dam break, as a function of the roughness coefficient (n), characterizing its uncertainties from the delimitation of the flood spot area, maximum depth, arrival time and flow velocity. To do this, a descriptive analysis was produced of the breach hydrographs generated by two different tools, EMBREA-MUD and HEC HMS. From these hydrographs, the two-dimensional hydrodynamic model of the non-Newtonian and Newtonian mudflow was evaluated using the HEC-RAS 6.3.1 software. For this, three scenarios were simulated: the first, based on the typical propagation of water, with a Newtonian scenario and normal-average manning coefficient; the second, based on increasing the manning coefficient to a high value in the downstream valley (unrealistic) to resemble the characteristics of non-Newtonian fluids, and the third scenario, equivalent to the simulation of the non-Newtonian fluid, which considers its behavior as Bingham plastic, with rheological parameters proposed in the literature and normal-average manning coefficient. The results of the simulations showed similar areas of flood stains and maximum depths for the first and third scenarios; however, the non-Newtonian fluid covered a larger cross-sectional area than the other scenarios, and the velocity and arrival time parameters diverged, with the latter two being closer between scenarios 2 and 3. In addition, scenario 2 showed greater longitudinal propagation, which is worrying in studies aimed at delimiting the Self-Rescue Zone (SRZ). Finally, the research showed that in areas of steep slope, the non-Newtonian fluid moved faster than the Newtonian fluid, since the weight of the flow, which acts as an additional force, favored acceleration.

Keywords: Manning coefficient, non-Newtonian fluids, wave arrival time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Principais elementos de uma barragem de terra – Barragem homogênea.	18
Figura 2 - Principais métodos de alteamento de barragens.	19
Figura 3 - Método de alteamento por linha de centro.	20
Figura 4 - Linha do tempo das alterações na legislação entre 2010 e 2022.	24
Figura 5 - Órgãos fiscalizadores.....	26
Figura 6 - Barragens de mineração do Brasil cadastradas no SIGBM	30
Figura 7 - Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais.	31
Figura 8 - Barragens que preocupam a fiscalização brasileira	33
Figura 9 - Quantitativo de barragens em Minas Gerais e Pará.....	36
Figura 10 - Rompimento de barragens no Brasil.	37
Figura 11 - Impactos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão.....	38
Figura 12 - Impactos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão.....	38
Figura 13 - Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG).....	39
Figura 14 - Momento da ruptura da Barragem 1.....	40
Figura 15 - Impactos na região da área administrativa devido o rompimento da Barragem 1.....	40
Figura 16 - Impactos nas comunidades em decorrência do rompimento da Barragem 1.....	41
Figura 17 - Estatísticas das barragens interditadas por falta de declaração de estabilidade no universo de estruturas em nível de emergência.	41
Figura 18 – Mecanismos de ruptura.	43
Figura 19 – Históricos das falhas ocorridas no período de 1910 à 2019.....	44
Figura 20 - Causas das falhas de barragens de rejeitos entre 1915 e 2016	45
Figura 21 - Parâmetros de abertura da brecha.....	46
Figura 22 - Aplicação de uma tensão de cisalhamento	47
Figura 23 - Tensão de cisalhamento x velocidade de cisalhamento.....	49
Figura 24 - Comportamento reológico dos fluidos	49
Figura 25 - Tensão de cisalhamento x velocidade de cisalhamento.....	50
Figura 26 - Módulos do sistema DAMSAT.	57
Figura 27 - Simulação da mancha de inundação de uma barragem.	58
Figura 28 - Gráficos e relatórios gerados no HEC-RAS.	59
Figura 29 - Métodos de abordagem da pesquisa.	62
Figura 30 – Mapa de Localização do Quadrilátero Ferrífero com Topografia.	63
Figura 31 - Fluxograma do processo.....	64
Figura 32 – Curva Cota x Volume (EMBREA-MUD).	65
Figura 33 – Configuração da falha gerada no EMBREA MUD para o cenário de piping.	66
Figura 34 – Configuração da falha gerada no EMBREA MUD para o cenário de liquefação.....	67
Figura 35 – Curva Cota x Volume (HEC-HMS).....	67
Figura 36 – Brecha de ruptura.....	68
Figura 37 – MDT – Modelo Digital do Terreno.	69
Figura 38 – Delimitação da malha.	70
Figura 39 – Localização das seções de interesse.....	70
Figura 40 – Métodos e parâmetros fluido não-newtoniano.....	77
Figura 41 -Total de fatalidades do ICMM e taxa de frequência de acidentes fatais 2012 – 2020.	80
Figura 42 - Rupturas e Incidentes em barragens de água e rejeito por modo de falha.	81
Figura 43 - Tipos de barragens de rejeitos e incidentes.	83
Figura 44 - Modos de falha em barragens de rejeitos.	85
Figura 45 - Falhas e rupturas em barragens de rejeitos entre 1910 e 2020.	91
Figura 46 - Média de falhas e rupturas nos últimos 109 anos em categorias de gravidade.	92
Figura 47 - Média de falhas e rupturas nos últimos 19 anos em categorias de gravidade.	92
Figura 48 - Hidrograma de ruptura gerado no EMBREA MUD para o cenário de piping.	95

Figura 49 - Hidrograma de ruptura gerado no EMBREA MUD para o cenário de liquefação.	96
Figura 50 – Armazenamento do reservatório em decorrência da brecha de ruptura.	97
Figura 51 - Hidrograma de ruptura gerado no HEC-HMS para o cenário de piping.	97
Figura 52 – Manchas de inundação para o cenário de piping.	99
Figura 53 – Comparação gráfica Simulação x Seção – Lâmina d'água.	100
Figura 54 – Comparação gráfica Simulação x Seção – Profundidade.	102
Figura 55 – Comparação gráfica Simulação x Seção – Velocidade.	104
Figura 56 – Comparação gráfica Simulação x Seção – Vazão de Pico.	106
Figura 57 – Comparativo dos modelos na região próxima à barragem.	108
Figura 58 – Comparativo dos modelos em um trecho ao longo do escoamento.	108
Figura 59 – Velocidade dos fluidos ao longo do escoamento na seção 2.	110
Figura 60 – Velocidade dos fluidos ao longo do escoamento na seção 3.	111
Figura 61 – Velocidade dos fluidos ao longo do escoamento na seção 4.	112
Figura 62 – Tempo de chegada nas seções de interesse.	113
Figura 63 – Boxplot das profundidades máximas obtidas a partir da variação do tipo de fluido e das distribuições do coeficiente de manning normal médio e alto – seção 2, 3 e 4.	115
Figura 64 - Boxplot das velocidades máximas obtidas a partir da variação das distribuições do coeficiente de manning normal médio e alto – seção 2,3 e 4.	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Legislação brasileira nos âmbitos federal, estadual e municipal	27
Quadro 2- Histórico de desastres envolvendo barragens em Minas Gerais	32
Quadro 3 - Casos de ruptura de barragens de contenção de rejeitos e de resíduos industriais entre 1986 e 2020.	34
Quadro 4 - Principais equações de previsão dos parâmetros de brecha disponíveis na literatura.....	46
Quadro 5 - Equações, modelos e parâmetros reológicos para fluidos não newtonianos.....	50
Quadro 6 - Caracterização de escoamentos em função da concentração de sólidos	51
Quadro 7 - Valores para a computação do coeficiente de <i>manning</i>	53
Quadro 8 - Coeficientes de rugosidade para canais naturais	54
Quadro 9 - Coeficientes de rugosidade para canais artificiais	55
Quadro 10 - Características reológicas dos fluidos simulados no cenário de erosão interna e piping. .	65
Quadro 11 - Características reológicas dos fluidos simulados no cenário de falha estrutural por liquefação.	66
Quadro 12 – Parâmetros da brecha de ruptura	68
Quadro 13 – Distâncias entre as seções de interesse e a barragem	71
Quadro 14 - Coeficientes de rugosidade para canais naturais	72
Quadro 15 - Intervalos de parâmetros reológicos de rejeitos	74
Quadro 16 - Características reológicas do fluido simulado.....	77
Quadro 17 - Ocorrência dos modos de falha.	82
Quadro 18 - Tipos de barragens de rejeitos e incidentes. Mesmo comentário das Quadros acima. Padronizar.	83
Quadro 19 - Modos de falha em barragens de rejeitos. Mesma sugestão acima.....	86
Quadro 20 - Modos de falha em barragens de rejeitos de 1900 até agosto de 2016.	87
Quadro 21 - Falhas em barragens de rejeitos por severidade ao longo dos anos	91
Quadro 22 - Probabilidade de falha por tipo de barragem	93
Quadro 23 - Percentual de modos de falha por tipo de barragem	94
Quadro 24 - Teste <i>Wilcoxon</i> - P- valor (Profundidade).....	114
Quadro 25 - Teste <i>Wilcoxon</i> - P- valor (Velocidade).....	117

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO	15
1.2 PERGUNTA DE PESQUISA	15
1.3 OBJETIVO GERAL	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 BARRAGENS.....	17
2.2 TECNOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	22
2.3 LEGISLAÇÃO.....	22
2.4 BARRAGENS NO BRASIL E NO MUNDO	30
2.5 BARRAGENS EM MINAS GERAIS	31
2.6 HISTÓRICO DE RUPTURAS	33
2.7 ESTATÍSTICA DE BARRAGENS	41
2.8 ESTUDO DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE BARRAGENS.....	42
2.9 MECÂNICA DOS FLUIDOS.....	47
2.10 TIPOS DE ESCOAMENTO E SUA CLASSIFICAÇÃO	52
3 MODELOS DE SOFTWARES E SISTEMA DE GEOPROCESSAMENTO	56
3.1 SISTEMA DAMSAT.....	56
3.2 HEC-RAS.....	58
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
4.1 SELEÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	63
4.2 DELINEAMENTO METODOLÓGICO	63
4.3 HIDROGRAMA DE RUPTURA	64
4.4 VARIÁVEIS DE ENTRADA E CONDIÇÃO DE CONTORNO	68
4.5 REOLOGIA DOS FLUIDOS.....	72
4.6 ANÁLISE DE DADOS E ESTATÍSTICA	78
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.1 ESTATÍSTICA DE FALHAS E RUPTURAS	78
5.2 HIDROGRAMA DE RUPTURA	95
5.3 MANCHAS DE INUNDAÇÃO	97
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO	113
6 CONCLUSÕES	118
7 TRABALHOS FUTUROS.....	119
REFERÊNCIAS	120

1 INTRODUÇÃO

Por fornecer insumos que estão presentes nos remédios, na agricultura, na construção civil, entre outros que são a base das cadeias produtivas das indústrias, a mineração se diferencia dos demais setores e ganha destaque pelo volume de resíduos gerados para cada tipologia mineral, e, principalmente, pelas características singulares e particularidades que são muito específicas e divergentes daquelas dos resíduos sólidos originados de outros segmentos como, por exemplo, os setores agropecuário, químico e petroquímico (IBRAM, 2016).

A mineração corresponde à uma atividade econômica e industrial que, segundo a Agência Nacional de Mineração - ANM (2023), consiste em um processo subdividido em fases de pesquisa, exploração, lavra (extração) e beneficiamento de minérios presentes no subsolo.

Dentre as fases do processo minerário, a lavra refere-se às fases do desenvolvimento do projeto e extração. Seu objetivo é realizar a retirada do minério da jazida. (IBRAM, 2016). A seleção do tipo de lavra a ser empregado está associado aos aspectos sociais, econômicos e ambientais, tecnológicos e geológicos. Entre os métodos de lavra existentes, destacam-se o método de lavra a céu aberto, onde as jazidas estão próximas à superfície, e lavra subterrânea, na qual as jazidas estão afastadas da superfície (ANM, 2023).

Segundo Drumond (2022), a etapa de beneficiamento corresponde ao processo desde a extração do recurso mineral até a transformação do minério bruto em uma matéria-prima. Para tal propósito não ocorrem alterações químicas no mineral.

Conforme o IBRAM (2016), durante o processo de extração mineral são empregadas técnicas de remoção dos minerais como o uso de ferramentas e equipamentos especializados que geram resíduos (estéril). O mesmo ocorre nas etapas subsequentes, tratamento e beneficiamento do minério, que produz o rejeito. O volume e os componentes químicos do rejeito formado variam conforme o minério extraído, porém, o potencial de dano ambiental e a possibilidade de presença de componentes contaminantes, torna inviável a disposição de qualquer rejeito de mineração no meio ambiente. Como solução de armazenamento e controle ambiental desse material, surge então as barragens. Por definição, as barragens são estruturas utilizadas como reservatório para contenção e acumulação de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos provenientes do processo de beneficiamento de minérios, o rejeito (ANM, 2021).

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (2023), dos anos de 1960 a 2022, indicam um aumento da população brasileira de 70,07 milhões para 203,08 milhões de habitantes, ou seja, uma expansão de 189,82% em 62 anos. Meirelles (2022) divulgou

resultados de estudos e pesquisas acerca do uso de tecnologia da informação (TI) em empresas, gerados a partir de uma amostra de 2.650 empresas de médio e grande porte. Os resultados indicaram a existência de 447 milhões de dispositivos digitais (computador, notebook, tablet e smartphone) em uso no Brasil no âmbito corporativo e doméstico, ou seja, mais de 2 dispositivos digitais por habitante. Em 2021, o IBGE, por meio da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua), versando sobre o módulo de Tecnologia da Informação e Comunicação – TIC, evidenciou que o celular é o dispositivo mais utilizado para acessar a Internet em casa, indicando 99,5%. Já a televisão foi o segundo equipamento mais utilizado para tal finalidade (44,4%), seguido do computador (42,2%) (CORREA, [sd]).

Ainda assim, a expansão populacional e a ascensão tecnológica possuem uma contribuição ínfima na elevação do consumo de produtos industriais que, por sua vez, necessitam de recursos e insumos provenientes da mineração. Dessa forma, o setor industrial é hegemônico na demanda de recursos oriundos da mineração.

A atividade minerária gera matérias-primas para vários seguimentos da economia brasileira. As siderúrgicas e metalúrgicas são altamente dependentes das cargas de minérios, que são beneficiados e transformados nos produtos de interesse. O ramo automobilístico e a construção civil demandam de aço. Fabricantes de máquinas industriais, transportadoras em tubos e até empresas de embalagem também são grandes consumidores desses materiais que são considerados indispensáveis para a manutenção da atividade industrial (ZAPAROLLI, 2023). O aumento da demanda no setor industrial nos últimos anos tem impulsionado significativamente a elevação da extração mineral no Brasil. Ainda, conforme Metso (2020), as projeções da Agência Internacional de Energia (IEA) indicam que, para atender a demanda da transição energética, a produção de lítio deverá crescer mais de 40 vezes e a necessidade de níquel, cobalto e grafite será entre 20 e 25 vezes maior do que a atual nos próximos 20 anos. Com isso, o crescimento do consumo industrial de recursos e insumos provenientes da mineração implica na elevação da extração mineral e, conseqüentemente, a produção de rejeitos multiplica.

Conforme o Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2016) e o Report Mensal Barragens de Mineração (ANA, 2022), o número de barragens de rejeito aumentou de 660 em 2015, para 909, em 2022.

Diante ao exposto, a Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, revisou a PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelecida pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabeleceu a PNSB e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragem. A PNSB destina-se às barragens de água, à disposição final ou

temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que atendem a pelo menos um dos seguintes critérios estabelecidos:

- a) Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- b) Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³;
- c) Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- d) Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

É notório que a mineração é benéfica e de extrema necessidade à sociedade, porém os desastres envolvendo rupturas de barragens produzem cenários devastadores e impactos sociais catastróficos. Segundo Fernandes (2020), o cenário de ruptura de barragem tem ocorrido com uma frequência acima do esperado em todo o mundo, sendo, em média, dois eventos por ano, ainda que sejam implantadas novas medidas reguladoras e fiscalizadoras. No Brasil, o estado de Minas Gerais marcou a última década com o registro dos maiores eventos de ruptura de barragens de rejeitos. Um deles, ocorreu em 2015 com o colapso da barragem de Fundão, que pertencia a mina de Germano, em Mariana e foi considerado a maior tragédia ambiental do Brasil. O segundo, transcorreu em 2019, com a ruptura da barragem B1 no Córrego do Feijão, no Município de Brumadinho, e, foi classificado como o maior acidente de trabalho da história do Brasil e o segundo maior desastre industrial do século XXI.

De acordo com dados fornecidos pela ANM (2021), Minas Gerais é um dos estados brasileiros com maior índice de barragens de rejeito, totalizando 209 barragens inseridas na PNSB e 144 não inseridas, devido a critérios estabelecidos. Em 2021, a Agência Nacional de Águas (ANA), elaborou uma lista com as barragens mais preocupantes no Brasil. Ao todo, foram apresentadas 122 barragens indicadas pelos órgãos fiscalizadores com algum comprometimento estrutural importante. Minas Gerais se destacou com o maior número de barragens preocupantes, totalizando 42 estruturas.

As análises de rompimento de barragem são empregadas para estimar os riscos potenciais associados a uma falha do barramento. As análises da mancha de inundação de rompimento de barragem incluem: estimativa dos parâmetros de rompimento da estrutura, estimativa do hidrograma de vazão de saída do rompimento do barramento, roteamento do hidrograma de ruptura da barragem a jusante e estimativa da extensão, e, severidade da inundação a jusante (FERC, 2014). Essas estimativas estão associadas à experiência e

conhecimento do responsável pela modelagem, o que aumenta as incertezas e diminui a confiabilidade da simulação, uma vez que cabe ao mesmo selecionar o tipo de análise de ruptura apropriado e o nível necessário de detalhes para a modelagem e mapeamento de inundação para garantir que eles sejam proporcionais às consequências previstas.

O resultado do estudo do escoamento hidrodinâmico, por consequência da ruptura hipotética de uma barragem, objetiva identificar a área de inundação com propósito de orientar ações de prevenção de acidentes, como por exemplo, a remoção de população e localização de equipes de emergência dentro da mancha de inundação (ALMEIDA, 2021). Portanto, conclui-se que os resultados desse tipo de estudo precisam considerar tanto as incertezas envolvidas, quanto à elevação do valor da rugosidade para a adaptação do fluido newtoniano na simulação de um rejeito, o que pode indicar valores distantes dos resultados com maior probabilidade de ocorrência.

As análises dos modos de falhas em barragens são complexas, contendo muitas falhas históricas de barragens com causas desconhecidas ou ausência de alguns dados. A contabilização das incertezas se faz necessária considerando que por meio dela é possível evitar a perda de vidas humanas em situações onde podem ser constatados erros nas simulações.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Para realizar os cálculos que determinam o fluxo de saída de um colapso de barragem são necessários parâmetros de entrada, como modo de falha, forma e tamanho da brecha, além do tempo de formação. As incertezas associadas à escolha desses parâmetros, assim como a seleção da metodologia da mancha de inundação, a estimativa de fluxo simultâneo e o comportamento dos sedimentos presentes no reservatório durante o colapso da estrutura, impactam diretamente no resultado da mancha de inundação.

A hipótese da pesquisa é que para uma determinada barragem de rejeito, a simulação de cenários com distribuições distintas do coeficiente de rugosidade (média normal e rugosidade alta, não real), a depender da variação do tipo de fluido (newtoniano e não-newtoniano), acarretam resultados significativamente diferentes com relação à delimitação da área de inundação, profundidade, velocidade do escoamento e o tempo de chegada da onda simulada para o rompimento hipotético do barramento.

1.2 PERGUNTA DE PESQUISA

“A consideração de diferentes viscosidades do fluido (fluido newtoniano ou não newtoniano) em estudos de ruptura hipotética de uma barragem resulta em manchas de

inundação significativamente diferentes, em termos de área da mancha de inundação, profundidade máxima, tempo de chegada da onda e velocidade do escoamento? Se sim, qual o tamanho da incerteza gerada? A utilização de diferentes *softwares* influencia no resultado do hidrograma de ruptura?”

1.3 OBJETIVO GERAL

Analisar estatisticamente a influência do tipo de fluido considerado no escoamento de uma ruptura hipotética de barragem, em função do coeficiente de rugosidade, utilizando análises descritivas entre os hidrogramas de ruptura, gerados pelas ferramentas EMBREA-MUD e HEC HMS.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir o modo de falha e a estrutura a ser estudada em função das suas características;
- Produzir hidrogramas de ruptura para estabelecer parâmetros de entrada para o modelo hidrodinâmico bidimensional do fluxo de lama (não-newtoniano) e de água (newtoniano);
- Comparar estatisticamente características das manchas de inundação decorrentes de simulações que consideram fluido newtonianos e não newtonianos;
- Analisar a diferença do tempo de chegada da onda, bem como sua profundidade máxima e velocidade do escoamento;
- Analisar a área atingida pela mancha de inundação, decorrente de simulações, que consideram fluidos distintos relacionados ao coeficiente de rugosidade.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nessa sessão foram reunidas informações para contextualizar a extensão e significância do tema delimitado, além de apresentar as legislações em vigor relacionadas. Foram apontados e discutidos os problemas e limitações acerca do tema exposto. Dessa forma, a revisão bibliográfica está separada em dez temas principais, sendo: (i) Barragens, cujo foco foi expor a relevância do tema, enfatizado apenas em barragens de rejeitos e segurança de barragens, temas estes abordados no trabalho; (ii) Tecnologias de disposição de rejeitos, onde o objetivo foi apresentar a forma de obtenção dos rejeitos; (iii) Legislação, focado na apresentação de legislações vigentes e em nas suas mudança ao longo do tempo; (iv) Barragens no Brasil e no mundo, objetivando apresentar um panorama dessas estruturas e a importância de mantê-las seguras; (v) Barragens em Minas Gerais, a fim de apresentar o cenário das barragens de mineração do estado;; (vi) Histórico de rupturas, que consistiu na apresentação do panorama de rupturas de barragens de rejeitos no Brasil e no mundo para a compreensão e justificativa do tema da pesquisa; (vii) Estatística de barragens, apresentada de forma breve, do Brasil, em nível de emergência, fato este determinante no espaço amostral de onde selecionou-se a barragem estudada; (viii) Estudo do rompimento hipotético de barragens, onde se apresentou os mecanismos de falha de barragens e definições dos parâmetros de brecha de ruptura; (ix) Mecânica dos fluidos e (x) Tipos de escoamentos e sua classificação, na forma de uma breve apresentação de conceitos relacionados aos tipos de fluidos e ao escoamento desse material.

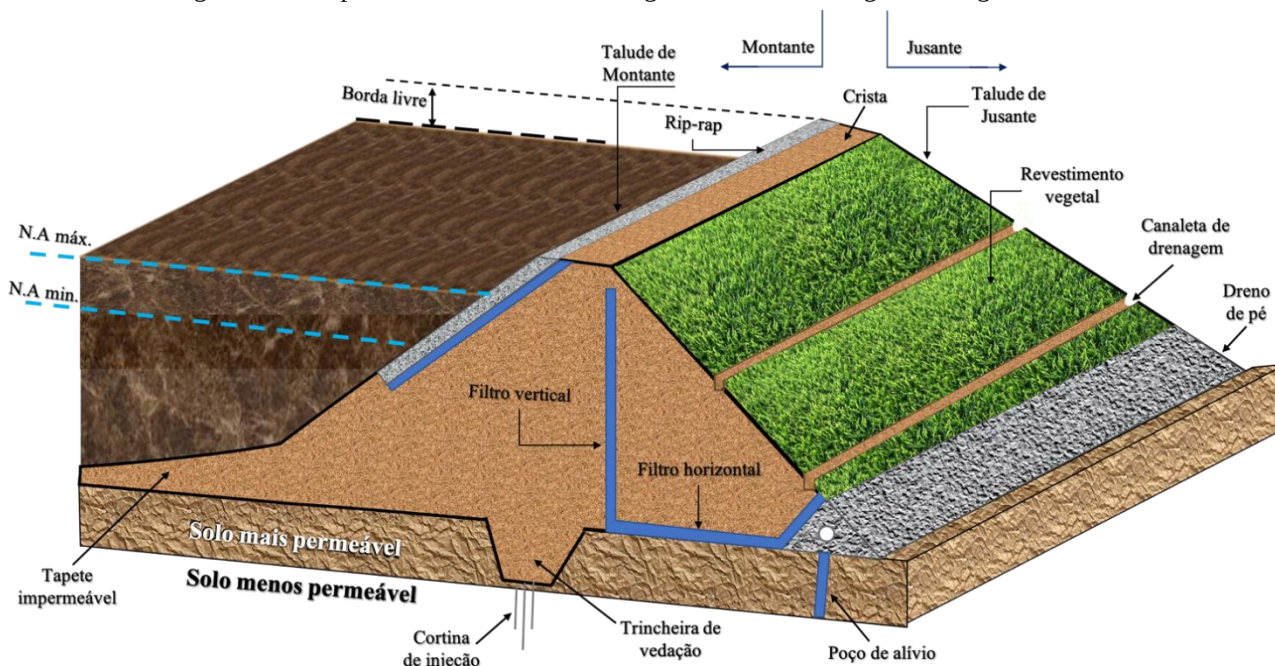
2.1 BARRAGENS

Na concepção da ANM (2021), as barragens são estruturas utilizadas como reservatório para contenção e acumulação de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos provenientes do processo de beneficiamento de minérios, o rejeito. De outro modo, a ANA (2022) define as barragens como qualquer estrutura que tenha sido construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas. De outro modo, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM estabelece por meio da Portaria nº 02, de fevereiro de 2019, que barragem é uma estrutura hidráulica transversal ao fluxo d'água superficial perene ou intermitente, com exceção aqueles de características efêmeras, para fins acumulação de água para usos múltiplos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

Entre os elementos de uma barragem de aterro, conforme a Figura 1, destacam-se os filtros horizontal e vertical, estruturas importantes no controle da drenagem interna e,

consequentemente, para a segurança global da barragem. Como a percolação no maciço é inevitável, haja visto que o rejeito sempre é depositado com algum percentual de água e, ainda, liberando água durante o processo de adensamento, o controle dessa vazão se torna fundamental para a segurança da estrutura (FERNANDES, 2020).

Figura 1- Principais elementos de uma barragem de terra – Barragem homogênea.



Fonte: Autora

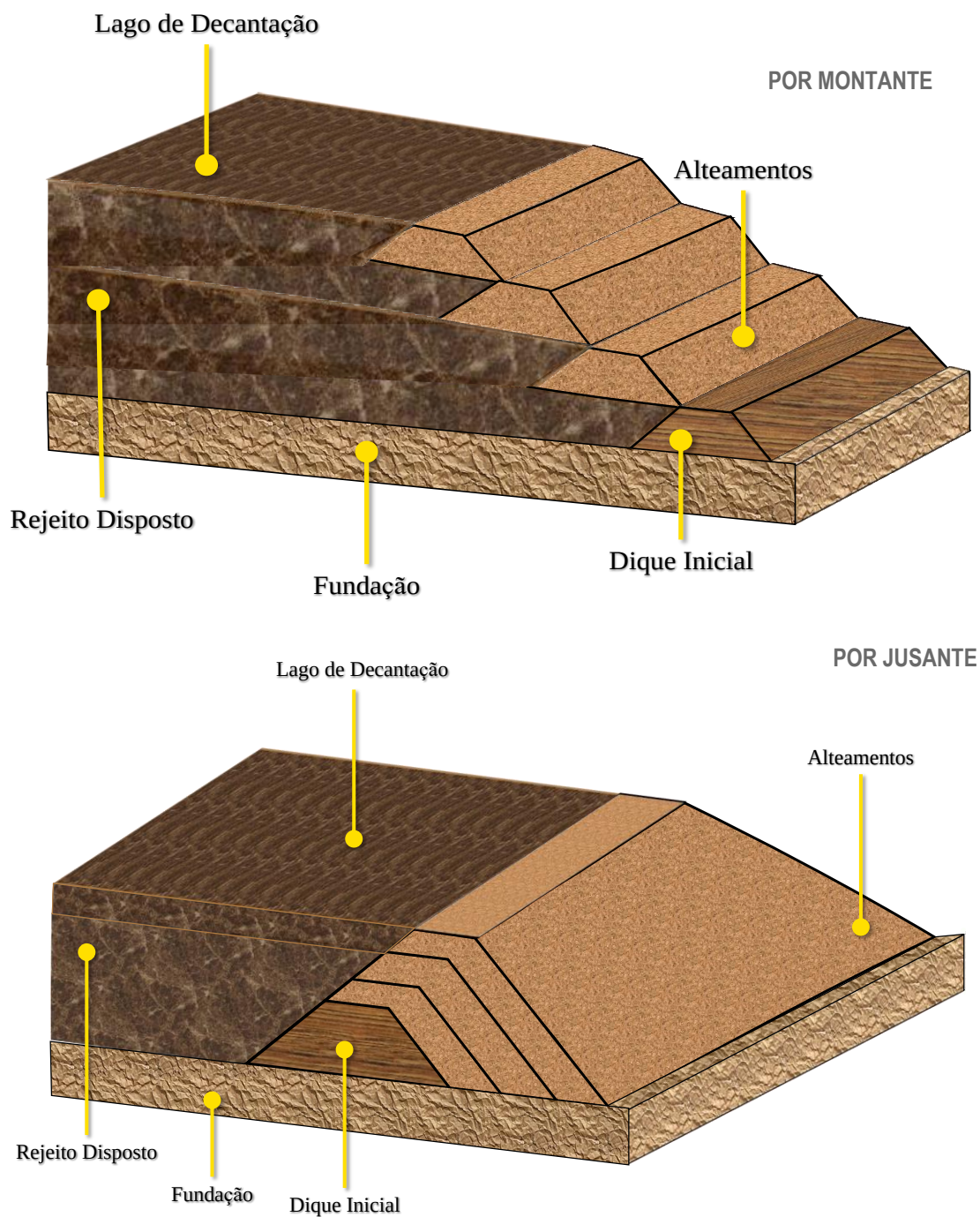
As barragens de rejeito geralmente utilizam solo compactado para a construção do maciço ou, até mesmo, porções segregadas de rejeito. Podem ser construídas em etapa única e, a depender do sequenciamento operacional, divididas em um ou mais alteamentos (FERNANDES, 2020).

Segundo Fernandes (2020), para o alteamento do maciço há três métodos a serem considerados, são eles: método por montante, por jusante e por linha de centro. Estas denominações referem-se à direção do deslocamento do eixo da barragem em relação ao dique inicial, conforme ocorrem os alteamentos ilustrado na Figura 2a e b.

Figura 2 - Principais métodos de alteamento de barragens.

a) Método de alteamento por montante

b) Método de alteamento por jusante



Fonte: Autora

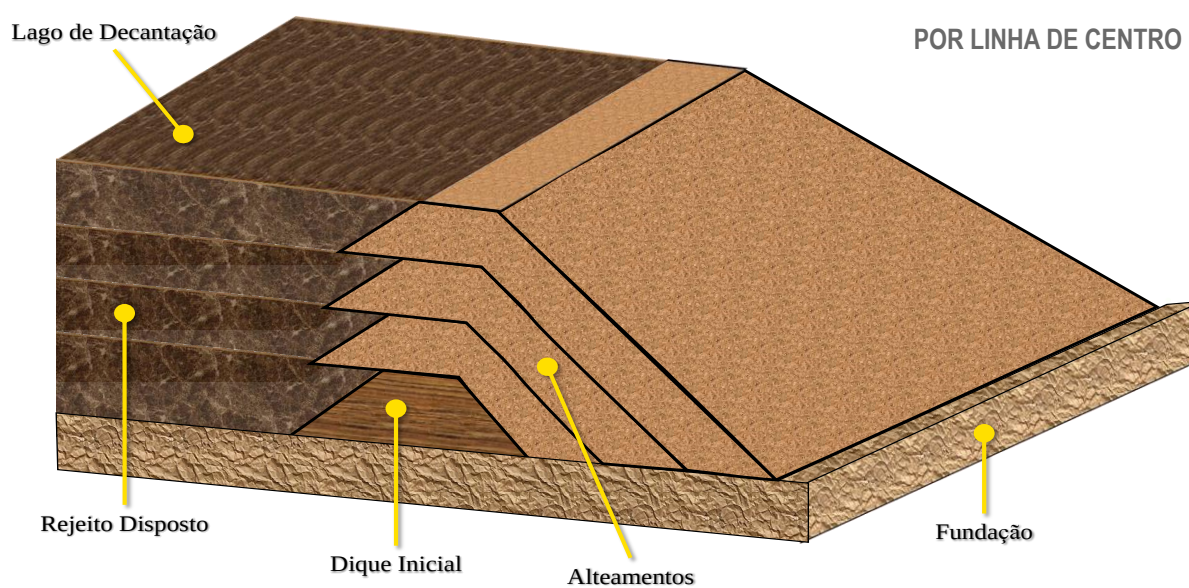
O alteamento por montante é o mais antigo, simples e de menor custo de construção. Inicialmente constrói-se um dique de partida e os rejeitos são dispostos perifericamente através da crista para formar a praia de rejeitos. Desta forma a praia torna-se a fundação para um segundo dique, sendo o processo repetido até que seja atingida a altura requerida de projeto (IBRAM, 2016). Em contrapartida, a praticidade apresentada pelo método, as rupturas de barragens alteadas por essa metodologia são frequentes, principalmente quando não são

observados os critérios de adensamento da praia de rejeitos para que seja utilizada como fundação (FERNANDES, 2020). Sendo assim, diante dos desafios técnicos atrelados a operação e controle deste tipo de estrutura, a Agência Nacional de Mineração publicou a Resolução ANM nº 04/2019 que proíbe a execução ou alteamento de barragens pelo método por montante.

O alteamento por jusante configura a ideia de maior segurança devido a construção de cada alteamento ser estruturalmente independente da disposição dos rejeitos, além da possível compactação de todo o corpo da barragem.

A Figura 3 demonstra o método de alteamento por linha de centro, representando a configuração da geometria intermediária entre os métodos anteriores, embora seu comportamento estrutural se assemelhe ao alteamento por jusante (FERNANDES, 2020).

Figura 3 - Método de alteamento por linha de centro.



Fonte: Autora

2.1.1 Finalidade das Barragens

Através das necessidades de uso da água, sejam elas para consumo próprio, abastecimento, irrigação, entre outros, surgiu-se a necessidade em conter e represar a água para sua acumulação.

Entende-se por barragem, uma estrutura que tem como finalidade represar e/ou armazenar água, rejeitos e sedimentos provenientes da mineração e resíduos industriais. As barragens podem ter objetivos diversos, como: contenção de água, geração de energia (hidrelétricas), acumulação para abastecimento humano ou industrial, reserva para períodos de estiagem, disposição de rejeitos ou sedimentos de mineração, controle de enchentes, irrigação,

recreação, regularização de vazões e perenização de cursos d'água, piscicultura, proteção contra maremotos, paisagismo, dessedentação de animais, defesa contra oscilações do nível do mar, combate as secas, transposição de bacias, entre outros (MELO; SANDRONI; GUIDICINI, 2021). Em concordância com Fernandes (2022), além de sua finalidade, essas estruturas também podem ser classificadas de acordo com o projeto hidráulico, comportamento estrutural e materiais construtivos.

2.1.2 Componentes das Barragens

Os componentes que envolvem as barragens podem variar devido à singularidade de cada barramento. As particularidades, que envolvem o projeto dessas estruturas, devem considerar uma série de estudos específicos para atender as necessidades de utilização e segurança do barramento, como: localização, tipo de uso, viabilidade técnica, econômica e ambiental.

Dentre os componentes dessas estruturas, a Figura 1 apresentada anteriormente, ilustra alguns que integram as barragens em aterro para fins de contenção de resíduos de mineração. em concordância com Fernandes (2022), as definições são:

- **Crista:** o topo da barragem que, em alguns casos, é utilizada como acesso e pistas para carros e caminhões;
- **Pé de montante:** a junção da face de montante de barragens gravidade ou em arco com a fundação;
- **Pé da barragem:** região do barramento em contato com a fundação na área de jusante;
- **Fundação:** superfície de material escavado, tratado ou em terreno natural;
- **Vertedouro:** estrutura para controle dos níveis de água no interior do reservatório (dispositivo de segurança);
- **Galerias (barragens de concreto):** são pequenas tubulações ou seções utilizadas para monitorar o desempenho da barragem com sistemas de drenagem para os fluxos no entorno;
- **Tubos de alívio:** tubulação utilizada para alívio de pressões em barragens de água ou para escoamentos de fluxos do reservatório;
- **Descarga:** tubos que são conectados na base do reservatório para limpeza e desassoreamento ou esvaziamento do reservatório;
- **Borda livre:** é a distância vertical entre a cota de soleira do vertedouro e a crista da estrutura.

- Material permeável: material que permite o fluxo de água no contato fundação-barramento, no barramento ou no filtro vertical;
- Material impermeável: material que controla ou impede o fluxo de água.

2.2 TECNOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Em função do tipo de minério processado e dos tratamentos adotados podem ser encontrados rejeitos com variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas. Os rejeitos, quando de granulometria fina, são denominados lama, e quando de granulometria grossa (acima de 0,074 mm), são denominados rejeitos granulares (DUARTE, 2008). O transporte dos rejeitos para sua disposição final pode ser na forma a granel (transportados por meio de caminhões ou correias transportadoras), ou na forma de polpa (mistura de água e sólidos), transportada por meio de tubulações com a utilização de sistemas de bombeamento ou por gravidade.

De forma geral, o IBRAM (2016) afirma que os rejeitos podem ser dispostos em:

- Minas subterrâneas;
- Cavas exauridas de minas;
- Pilhas;
- Empilhamento a seco (método “*dry stacking*”);
- Disposição em pasta; e
- Barragens de contenção de rejeitos (do tipo por montante, por jusante e “por linha de centro”).

Ainda, de acordo com o IBRAM (2016), a seleção de um método ou outro para a disposição dos rejeitos depende de fatores como:

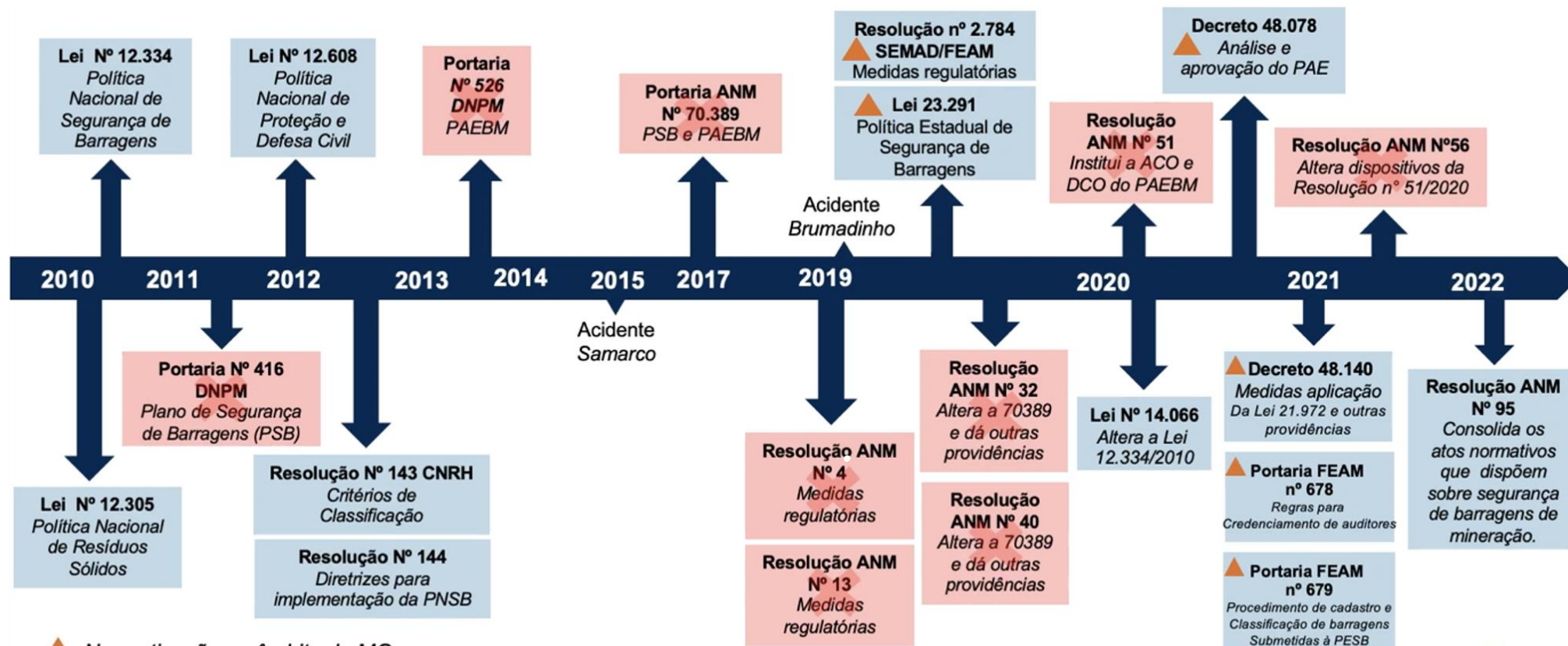
- Natureza do processo de mineração;
- Condições geológicas e topográficas da região;
- Propriedades mecânicas dos materiais;
- Poder de impacto ambiental de contaminantes dos rejeitos; e
- Condições climáticas da região.

2.3 LEGISLAÇÃO

Em virtude dos constantes colapsos de barragens, a legislação brasileira de barragens tem passado por diversas modificações, conforme a Figura 4. A legislação específica que trata de barragens, a Lei 12.334/10 alterada pela Lei nº 14.066, é a que estabelece a PNSB. A legislação conta com Portaria nº 416/12, que, dentre outras coisas, criou o Cadastro Nacional de Barragens

de Mineração; a Resolução nº 143, que estabelece os critérios gerais de classificação de barragens; e a Portaria no 526/13, que trata dos detalhes do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração – PAEBM.

Figura 4 - Linha do tempo das alterações na legislação entre 2010 e 2022.



▲ Normatização no âmbito de MG

Ficam revogadas as Portarias DNPM nº 416 e 526 a partir da publicação da nova Portaria DNPM nº 70.389. Ficam revogadas a Portaria DNPM nº 70.389/2017, as Resoluções ANM nº 13/2019, 32/2020, 40/2020, 51/2020 e a 56/2021 a partir da publicação da Resolução ANM nº 95/2022

Fonte: Autora

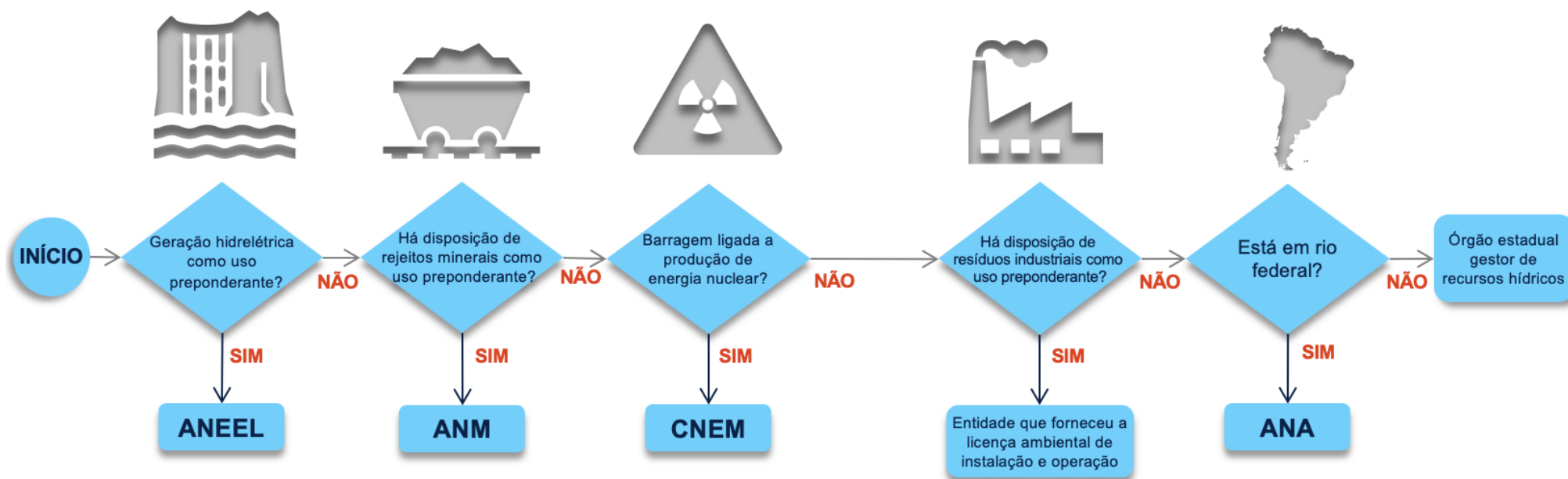
Segundo Machado e Azeez (2018), o Projeto de Lei do Senado 224/2016 modificou a Lei 12.334/2010, estabelecendo novos critérios para a inclusão de represas no âmbito das políticas para o setor. Também houve alterações acerca das definições dos termos barragem e empreendedor; e foram incluídas definições para acidente e desastre. Além disso, o Projeto de Lei do Senado 224/2016 também reitera que a responsabilidade civil por parte do empreendedor por danos decorrentes de falhas da barragem independe de culpa do ponto de vista penal.

A responsabilidade de fiscalizar se divide entre cinco grupos, de acordo com a finalidade da barragem (BRASIL, 2010) (Figura 5):

- Barragens para geração de energia, fiscalizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL;
- Para contenção de rejeitos minerais, fiscalizadas pela ANM;
- Barragens para produção de energia nuclear, fiscalizadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEM;
- Barragens para contenção de rejeitos industriais, sob responsabilidade do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - Ibama e/ou órgãos ambientais estaduais que forneceram a licença ambiental de instalação e operação;
- As de usos múltiplos, sob fiscalização da Agência Nacional de Águas – ANA ou de órgãos gestores estaduais de recursos hídricos.

O Quadro 1 tem como objetivo apresentar um breve panorama das principais legislações brasileiras vigentes no âmbito federal e estadual para barragens de mineração.

Figura 5 - Órgãos fiscalizadores.



Fonte: Autora

Quadro 1 - Legislação brasileira nos âmbitos federal, estadual e municipal

No âmbito federal	
Lei Federal no 12.305/2010 – 02 de agosto de 2010	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências, que apresenta o rejeito da mineração como uma categoria de resíduo (art.13, inciso I, “k”).
Lei Federal no 12.334/2010 – 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.
Ministério do Meio Ambiente – Conselho Nacional de Recursos Hídricos – Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012	Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei no 12.334, de 20 de setembro de 2010.
Ministério do Meio Ambiente – Conselho Nacional de Recursos Hídricos – Resolução no 144, de 10 de julho de 2012	Estabelece diretrizes para implantação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997.
Portaria nº 416 – 03 de setembro de 2012	Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei no 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens.
Portaria nº 14 – 15 de janeiro 2016	Estabelece prazo para apresentação de comprovante de entrega das cópias físicas do Plano de Ação de Emergência de Barragem de Mineração (PAEBM) para as Prefeituras e Defesas Cíveis municipais e estaduais, conforme exigido pelo art. 7º da Portaria nº 526, de 2013, e dá outras providências.

Portaria nº 70.389 – 17 de maio de 2017	Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB.
Resolução nº13 – 08 de agosto de 2019	Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências.
Lei nº 14.066 – 30 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).
Resolução nº95 – 07 de fevereiro de 2022	Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.
Resolução nº130 – 2023	Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências.
No âmbito estadual – Minas Gerais	
Estado de Minas Gerais	Define os requisitos legais da Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17 de dezembro de 2002 e da Deliberação Normativa COPAM nº 87, de 17 de junho de 2005 e Deliberação Normativa COPAM nº 124, de 09 de outubro de 2008 que dispõem sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração.
Decreto nº 46.933, de 2 de maio de 2016	Institui a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem e dá outras providências

Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.372 – 06 de maio de 2016	Estabelece diretrizes para realização da auditoria extraordinária de segurança de barragens de rejeito com alteamento para montante e para a emissão da correspondente Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade de que trata o Decreto nº 46.993 de 02 de maio de 2016 e dá outras providências.
Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784 – 21 de março 2019	Determina a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos, alteadas pelo método a montante, provenientes de atividades minerárias, existentes em Minas Gerais e dá outras providências.
Lei nº 23.291 – 25 de fevereiro de 2019	Institui a política estadual de segurança de barragens.
Decreto nº 48.078 – 05 de novembro de 2020	Regulamenta os procedimentos para análise e aprovação do Plano de Ação de Emergência – PAE, estabelecido no art. 9º da Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que instituiu a Política Estadual de Segurança de Barragens.
Decreto nº 48.140 – 25 de fevereiro de 2021	Regulamenta dispositivos da Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens, estabelece medidas para aplicação do art. 29 da Lei nº 21.972, de 21 de janeiro de 2016, e dá outras providências.
Portaria FEAM nº 678 – 06 de maio de 2021	Estabelece regras para o credenciamento de auditores para a prestação de serviços de auditoria técnica de segurança de barragens no âmbito da Política Estadual de Segurança de Barragens e dá outras providências.
Portaria FEAM nº 699 – 07 de junho de 2023	Formaliza os procedimentos do Programa de Gestão de Barragens da FEAM e dá outras providências.
Decreto nº 48.747 – 29 de dezembro de 2023	Regulamenta a caução ambiental estabelecida na alínea “b” do inciso I e na alínea “b” do inciso III, ambos do art. 7º da Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens.
Notas:	
ABNT NBR 13028:2017	Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos.
ABNT NBR 13029:2017	Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.

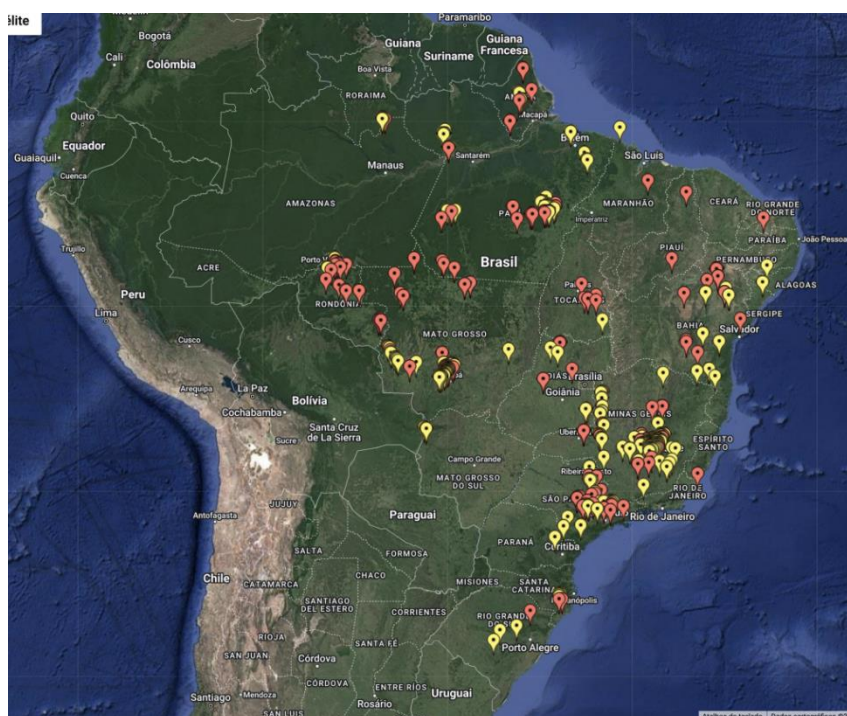
Fonte: Adaptado de ANM (2023), FEAM (2023) e IBRAM (2022).

2.4 BARRAGENS NO BRASIL E NO MUNDO

Em 2021, um estudo publicado pelo CSP2 – *Center for Science in Public Participation*, objetivava estimar o número de barragens de rejeitos existentes no mundo, uma vez que não se tem esse quantitativo e as bases de dados existentes são incompletas, o que gera imprecisão acerca dos resultados. Para realizar essa estimativa, os autores contabilizaram os dados oficiais de barragens apresentados por diversos países e em bancos de dados distintos, encontrando no total de 19.214 barragens. Com base nos dados da produção mineral mundial, o número encontrado correspondia a cerca de 60% do total de barragens de rejeitos no mundo. Portanto, baseado nos dados da produção mineral, o número total de barragens de rejeitos no mundo que corresponderia a 100% da produção mineral seria de 32.023 barragens.

No Brasil, o número de barragens de mineração pode ser consultado através do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração – SIGBM¹ Público. Essa ferramenta contempla o registro das barragens de mineração brasileiras, juntamente com as informações características da estrutura, como altura, nível do reservatório entre outras; e as informações estabelecidas pela legislação vigente. Atualmente, o SIGBM (2023) registrou a existência de 924 estruturas, sendo 457 inseridas na PNSB (amarelo) e 467 em vermelho, as estruturas que se não se enquadram na PNSB, Figura 6.

Figura 6 - Barragens de mineração do Brasil cadastradas no SIGBM



Fonte: SIGBM, 2023.

¹ SIGBM Público: <<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Mapa>>

2.5 BARRAGENS EM MINAS GERAIS

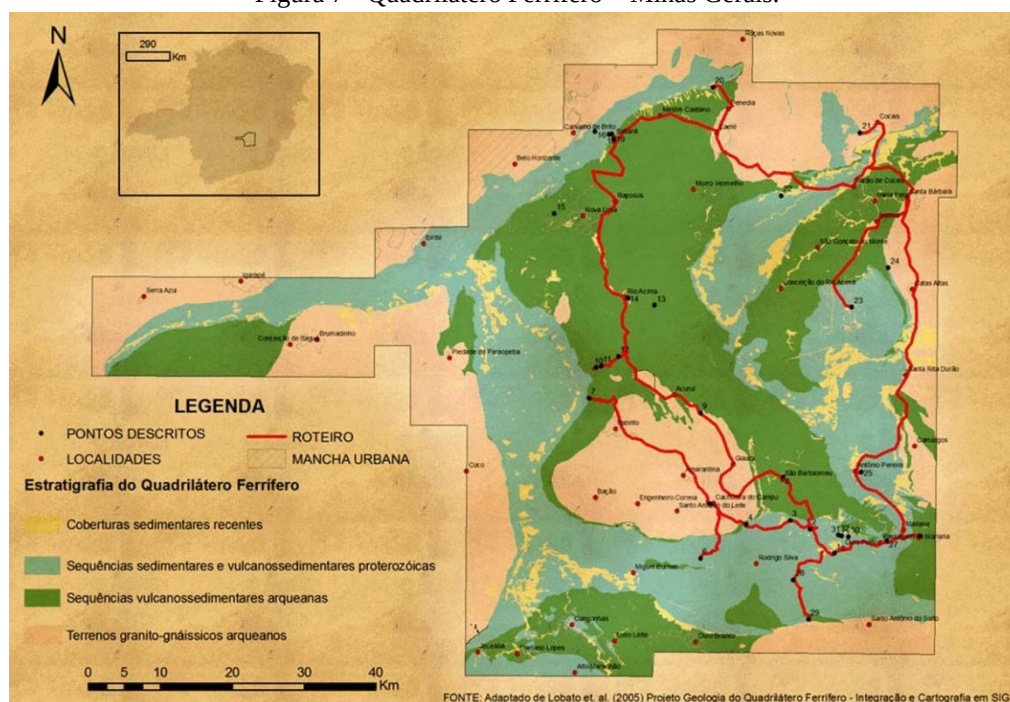
De acordo com os dados apresentados pelo IBRAM (2016), Minas Gerais é o estado responsável por aproximadamente 53% da produção brasileira de minerais metálicos e 29% de outros tipos de minério. Ainda, o estado ocupa o primeiro lugar em arrecadação da CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais), que corresponde à 47% do valor arrecadado no Brasil.

Com mais de 300 minas em operação, o estado possui 40 das 100 maiores minas brasileiras. A atividade mineradora se concentra em mais de 400 municípios do estado sendo que 7 estão entre os 10 maiores municípios mineradores, entre eles, Itabira que é o maior do país. (IBRAM, 2016)

Segundo o IBRAM (2015), o estado de Minas Gerais possui uma numerosa diversidade de recursos minerais. Contudo, apenas o ferro, o manganês, o ouro e, posteriormente o alumínio destacam-se devido a abundância desses minerais. Os demais minerais presentes na região não apresentam reservas que viabilizam uma atividade extrativa em larga escala e por longo espaço de tempo.

A existência da grande concentração de ferro na região central do estado mineiro, compreendida entre o rio Velhas e o rio Paraopeba (oeste) e rios Santo Antônio e Piracicaba até a confluência com o rio Doce (leste), tornou-se pública e deu origem a definição da região como Quadrilátero Ferrífero, Figura 7. (IBRAM, 2015)

Figura 7 - Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais.



Fonte: Noronha, 2020.

Fatores históricos indicam que o crescimento e a importância socioeconômica do estado são fortemente influenciados pelo desempenho da mineração que, por sua vez, é uma das principais matrizes econômicas do estado. Devido a expansão das atividades minerárias e sua concentração no estado, que influencia na economia, o número de barragens aumentou ao longo dos anos e aproximou geograficamente essas estruturas das comunidades. Essa proximidade expõe a comunidade aos riscos decorrentes do colapso das estruturas.

Na atualidade, os marcos legislatórios têm sofrido alterações significativas, motivadas, sobretudo, pela sequência de desastres, envolvendo fatalidades, em decorrência do rompimento de barragens, conforme expressa o Quadro 2:

Quadro 2- Histórico de desastres envolvendo barragens em Minas Gerais

Ano	Município	Descrição Sintética	N de mortes
1986	Itabirito	Rompimento da barragem da mina do Fernandinho.	7
1997	Rio Acima	Rompimento da barragem Rio das Pedras. (danos ambientais e diversas famílias desabrigadas)	-
2001	Nova Lima	Rompimento da barragem da Mineração Rio Verde, em Macacos. (danos ambientais)	5
2003	Cataguases	Rompimento da barragem da indústria Cataguases. (interrupção do abastecimento de água em diversos municípios, além de prejuízos econômicos e danos ambientais)	-
2007	Miraí	Rompimento da barragem da mineradora Rio Pomba Cataguases (milhares de pessoas desalojadas e danos ambientais)	-
2014	Itabirito	Rompimento da Herculano Mineração (mortes de funcionários)	3
2015	Mariana	Rompimento da barragem de Fundão, da Samarco, deixando devastadas diversas comunidades próximas a barragem (danos ambientais)	19
2019	Brumadinho	Rompimento da barragem B1, Vale. (danos ambientais)	270
2022	Nova Lima	Galgamento do Dique Lisa (sem ruptura), Mina do Pau Branco, Vallourec. (bloqueio da rodovia BR-040 e uma pessoa ferida)	-

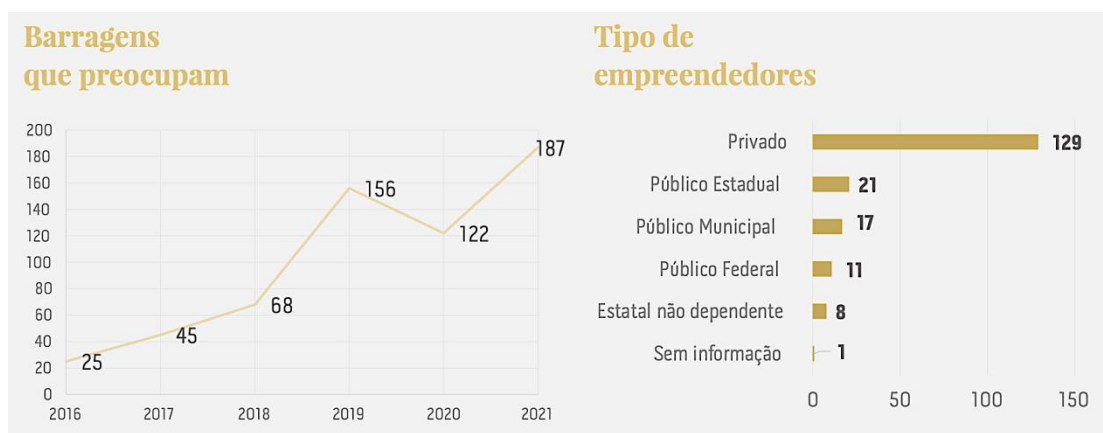
Fonte: Adaptado de WISE URANIUM (1998)

O Relatório de Segurança de Barragens da ANA (2021), reportou a existência de 187 barragens de água e rejeitos consideradas como preocupantes segundo os órgãos fiscalizadores. Esse registro compreende um aumento de 54% em relação ao RSB anterior, segundo apresenta a Figura 8. As estruturas em questão estão localizadas em 22 estados, em destaque Minas Gerais (66), Goiás (18), Pará (18) e Pernambuco (15).

Segundo ANA (2021), os critérios usados para essa classificação estão relacionados quanto ao DPA/CRI (51%), a realização de vistorias *in loco* (37%) e as suas classificações

próprias de nível de perigo/segurança/emergência, que variam de acordo com os regulamentos de cada fiscalizador (11%).

Figura 8 - Barragens que preocupam a fiscalização brasileira



Fonte: ANA, 2021.

2.6 HISTÓRICO DE RUPTURAS

2.6.1 No Mundo

Os registros do histórico de falhas em barragens de rejeitos entre 1910 e 2010, indicam uma redução do número de falhas e incidentes, o que evidencia o sucesso da regulamentação minerária, melhores práticas da indústria e tecnologia moderna. No entanto, o histórico dessas falhas mostra uma tendência emergente e pronunciada desde 1960 para uma maior incidência de falhas “Graves” e “Muito Graves”, ou seja, embora a frequência dessas ocorrências diminuiu, a consequência da perda se tornou cada vez maior. (BOWKER e CHAMBERS, 2015)

Em seu estudo, Bowker e Chambers (2015) registraram a ocorrência de 525 incidentes de barragens no mundo entre 1940 e 2010. Dentre eles, 67 foram classificados como falhas graves e muito graves, sendo que 49% (33) ocorreram após os anos 1990. Ainda, 63% de todos os incidentes e falhas registrados desde 1990 foram graves, geraram impactos significativos ou envolveram perda de vidas, ou muito graves, falhas catastróficas que liberaram mais de 1 milhão de m³ de rejeitos e, em alguns casos, resultou em múltiplas perdas de vidas.

Em 2001, o ICOLD reportou um estudo com o histórico de acidentes que aponta como principais causas de rompimento de barragens falhas de fundação, capacidade inadequada dos vertedouros, instabilidade dos taludes da estrutura, controle de erosão, deficiências no controle e inspeção pós-operação. Todas as causas dos incidentes estão ligadas de forma direta à falta de controle durante a vida útil do barramento e associadas a problemas operacionais envolvendo a presença de água.

O Quadro 3 apresenta alguns casos de ruptura de barragens de rejeitos e de resíduos industriais no mundo entre os anos 1970 e 2020.

Quadro 3 - Casos de ruptura de barragens de contenção de rejeitos e de resíduos industriais entre 1986 e 2020.

Mês e ano	Localização	Tipo de incidência	Impacto
Maio/ 1986	Itabirito – MG Brasil	Liquefação estática – Explosão nas paredes da barragem Rejeito: Metal	Rejeitos percorreram 12km no vale de jusante
Janeiro/2007	Miraí, MG – Brasil	Galgamento Rejeito: Bauxita	Sem vítimas fatais
Abril/2009	Barcarena – PA Brasil	Galgamento – sistema de drenagem ao redor da bacia dos rejeitos após fortes chuvas Rejeito: Bauxita	O deslizamento da ruptura na barragem de rejeitos destruiu casas, matou três pessoas e várias ficaram feridas
Outubro/2010	Reservatório 10 em Ajka – Hungria	Liquefação estática – saturação excessiva, sem drenagem Rejeito: Bauxita	Resíduos pesados que queimam quando reage com a pele
Agosto/2014	Mount Polley – Canadá	Fundação – falha na fundação – solo glacial Rejeito: Cobre e ouro	Sem vítimas fatais, mas muitos desabrigados
Setembro/2014	Herculano Mineração, MG – Brasil	<i>Piping</i> – falha do sistema de drenagem interna por excesso de resíduos no reservatório Rejeito: Ferro	
Novembro/2015	Fundão, MG – Brasil	Liquefação estática – com deslizamento	7 vítimas fatais e 400 desabrigados
Agosto/2016	New Wales plant, Mulberry, Polk Country – USA	<i>Piping</i> – um buraco de 14m de extensão surgiu em uma pilha de fosfogesso, abrindo um caminho de líquidos contaminados no subterrâneo. O líquido alcançou o aquífero Floridan, o maior reservatório de água potável da região. Rejeito: Fosfato	
Outubro/2016	Mina Antamok (inativa), Itogon, Província Benguet – Filipinas	<i>Piping</i> - Fluxo de rejeitos de ouro através da drenagem subterrânea após fortes chuvas. Rejeito: Ouro	Os rejeitos vazaram no rio Liang, depois no rio Ambalanga até alcançar o rio Agno.

Quadro 3 - Casos de ruptura de barragens de contenção de rejeitos e de resíduos industriais entre 1986 e 2020.

Mês e ano	Localização	Tipo de incidência	Impacto
Fevereiro/2018	Barcarena – PA Brasil	Galgamento – após fortes chuvas, mas a empresa afirma que não ocorreu esse fato Rejeito: Bauxita	Líquido de resíduos alcalinos invadiram áreas residenciais, afetando o sistema de abastecimento de água
Março/2018	Cadia, New South Wales – Austrália	Fundação – ruptura da barragem em função de material de baixa resistência na fundação. Rejeito: Ouro e prata	Falha no maciço da barragem
Junho/2018	Cieneguita mine, Urique, Chihuahua – México	Diversas – ruptura da barragem de rejeitos. Rejeito: Ouro e Prata	Rejeitos percorreram 29km a jusante e maioria foi depositado no curso do rio Cañitas. O órgão federal de proteção (PROFEPA) disse que os rejeitos não contêm cianeto ou metais pesados. Três vítimas fatais e quatro ainda permanecem desaparecidas
Janeiro/2019	Brumadinho, MG – Brasil	Liquefação estática (<i>creep</i>) Rejeito: Ferro	250 vítimas fatais e 20 ainda desaparecidas
Março/2019	Machadinho d'Oeste, Oriente Novo, Rondônia – Brasil	Diversas – ruptura de barragens inativas em função das fortes chuvas Rejeito: Alumínio	Ruptura atingiu sete pontes, deixando 100 famílias isolada; sem vítimas fatais e pessoas desalojadas
Outubro/2019	Nossa Senhora do Livramento, Mato Grosso – Brasil	Diversas – ruptura da barragem Rejeito: Ouro	Rejeitos percorreram de 1 a 2 km do vale de jusante
Outubro/2019	Barragem TB01, MT – Brasil	Sem informações Rejeito: Ouro	
Outubro/2019	Seiba, Sibéria – Rússia	Erosão – decorrente das fortes chuvas Rejeito: Ouro	17 vítimas fatais

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2020.

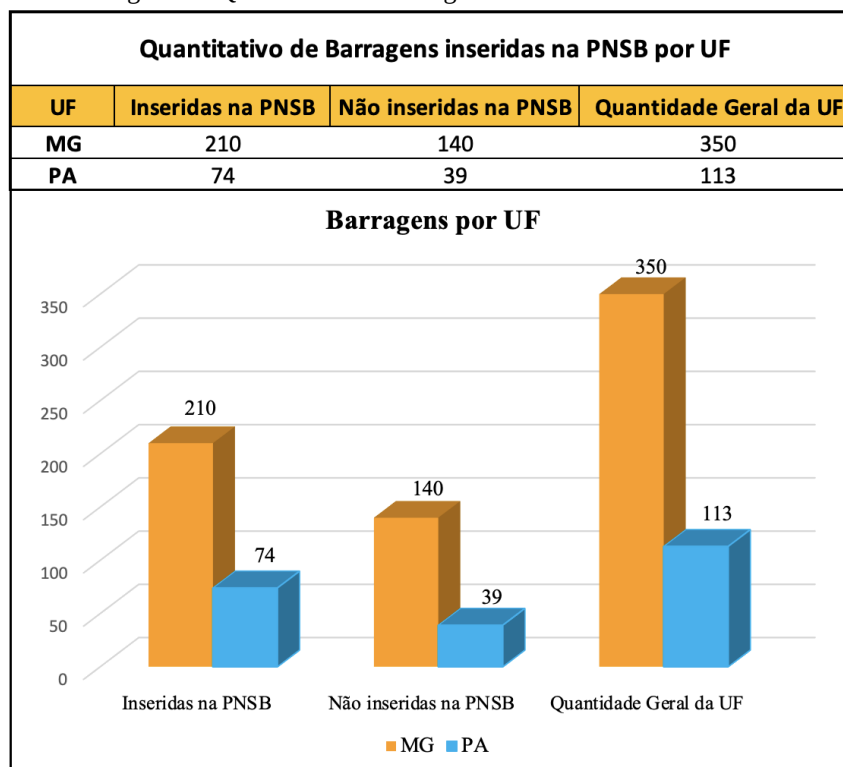
2.6.2 No Brasil

Segundo os dados fornecidos pela ANA (2021), que é o órgão fiscalizador que consolida o Relatório de Segurança de Barragens (RSB), no Brasil existem pelo menos 24.092 barragens, com diferentes usos, no entanto, esse número pode ser ainda maior, uma vez que a compilação

dos dados depende de que outros órgãos competentes pela fiscalização realizem o cadastro das estruturas no sistema de dados do governo.

Os dados do SIGBM Público (2022), estimam que atualmente o Brasil possui cerca de 906 barragens de mineração, dessas, 455 estão enquadradas na PNSB. Dos estados brasileiros, Minas Gerais é o maior detentor dessas estruturas um somatório de 210 (PNSB), seguido do Pará com 74 (PNSB) tal como representa a Figura 9.

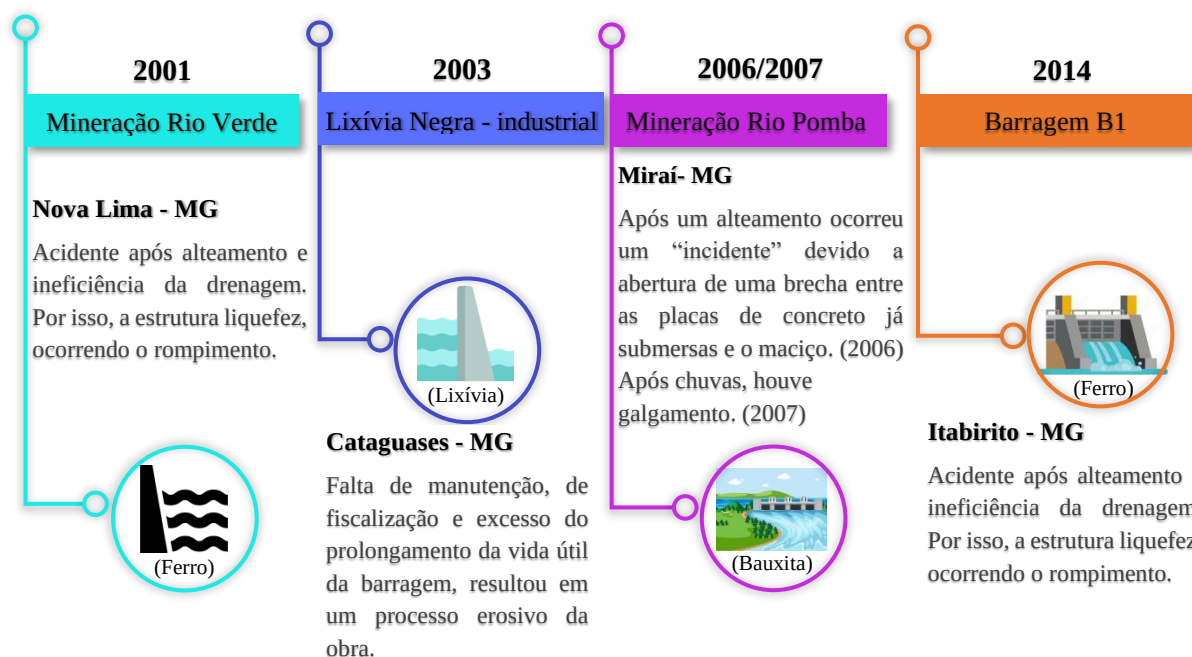
Figura 9 - Quantitativo de barragens em Minas Gerais e Pará.



Fonte: Adaptado de ANM (2022)

Embora existam incertezas quanto ao número total de barragens existentes, Warburton *et al.* (2020) afirma com base em dados estatísticos que o Brasil é considerado um dos países com maior número de barragens de rejeitos, ficando atrás apenas da Austrália e Canadá. Com isso, o rompimento dessas estruturas tem sido frequente, e tem apresentado impactos cada vez maiores, principalmente no estado de Minas Gerais, onde 6 barragens se romperam nos últimos 20 anos, como ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Rompimento de barragens no Brasil.



Fonte: Autora

Em novembro de 2015, ocorreu o colapso da barragem Fundão em Marina (MG), situada no Complexo Industrial de Germano, que implicou em 19 mortos (Figura 11 e Figura 12). Até então esse é considerado como o maior desastre ambiental, devido a liberação instantânea de aproximadamente 40 milhões de m³ de rejeitos contendo ferro e sílica, entre outros particulados. Outros 16 milhões de m³ continuaram escoando lentamente. Auditorias realizadas após o rompimento apontaram que a barragem da mineradora Samarco Mineração S/A apresentava um histórico de falhas tanto no processo de licenciamento, quanto durante sua construção, operação e administração que, a partir dessa sequência de falhas, tornaram a estrutura mais frágil, culminando em seu colapso (Figura 13) (FREITAS; SILVA, 2019).

Figura 11 - Impactos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão.



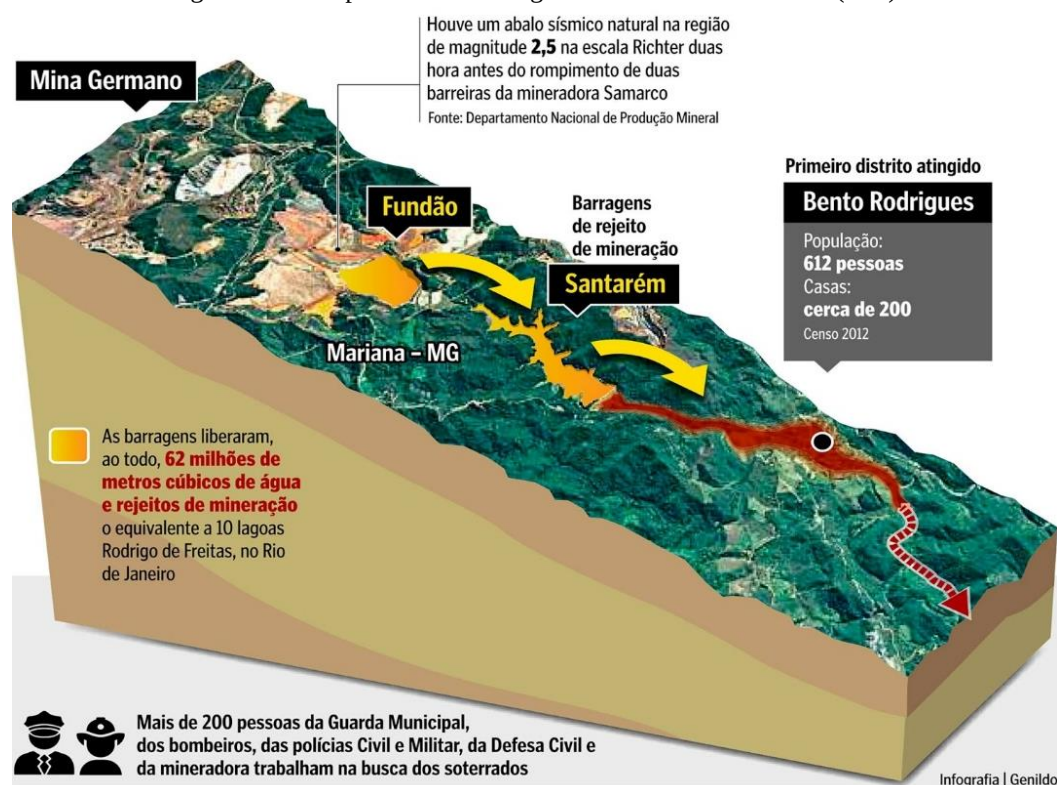
Fonte: Daniel Marengo - 2015 / Arquivo O Globo

Figura 12 - Impactos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão.



Fonte: Edmundo Antônio Dias via Ministério Público Federal

Figura 13 - Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG).



Fonte: Genildo Ronchi, Infografia (2019)

Em janeiro de 2019, mais uma vez Minas Gerais protagonizou um desastre histórico envolvendo barragens de mineração. O colapso da Barragem 1 da Mina Córrego de Feijão, (Figura 14) localizada no município de Brumadinho, região metropolitana de Belo Horizonte, foi a causa do maior acidente de trabalho do Brasil. A onda de rejeitos liberada se deslocava a uma velocidade de 120 km/h. A onda devastou a estação de carregamento da mina, a área administrativa, incluindo o refeitório, e duas bacias menores de contenção de sedimentos – B4 e B4A, Figura 15. A lama percorreu uma extensão de aproximadamente 7 km até chegar ao Rio Paraopeba, onde destruiu a ponte do ramal ferroviário da mina, e se alastrou pela área da comunidade local Vila Ferteco, próximo ao município de Brumadinho, Figura 16 (WISE URANIUM, 2022). Uma análise realizada pelo Ibama em 2019 afirma que o rastro de destruição deixado pela lama foi 269,84 hectares, o equivalente a 377 campos de futebol.

Foi comprovado que o alerta sonoro não funcionou no momento da ruptura, o que impossibilitou a chance de fuga de diversos trabalhadores que estavam no refeitório localizado a jusante da estrutura. Entre funcionários da Vale, terceirizados e a comunidade, 270 óbitos foram registrados.

Figura 14 - Momento da ruptura da Barragem 1.



Fonte: Google imagens

Figura 15 - Impactos na região da área administrativa devido o rompimento da Barragem 1.



Fonte: Google imagens

Figura 16 - Impactos nas comunidades em decorrência do rompimento da Barragem 1.

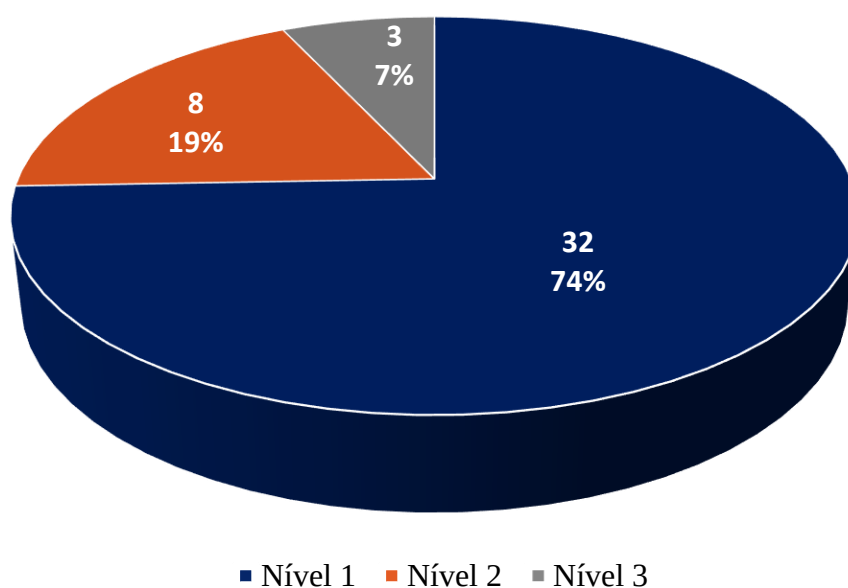


Fonte: Google imagens

2.7 ESTATISTICA DE BARRAGENS

De acordo com o relatório da entrega de DCE – Declaração de Condição de Estabilidade (ANM, 2021), as informações levantadas pela Gerência de Segurança de Barragens de Mineração (GSBM) possibilitaram o tratamento estatístico dos dados que resultaram na Figura 17.

Figura 17 - Estatísticas das barragens interditadas por falta de declaração de estabilidade no universo de estruturas em nível de emergência.



Fonte: ANM, (2021)

O Sistema Integrado de Gestão de Barragem de Mineração (SIGBM) evidencia que, no universo de 447 barragens que se enquadram na PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens, 439 tiveram as DCEs submetidas. Dessas, 404 atestaram a estabilidade, ao passo que, 35 não atestaram estabilidade. Foram enquadradas como barragem sem estabilidade atestada as 8 estruturas que não enviaram a DCE, dentre elas, 6 foram inseridas na PNSB ou cadastradas no SIGBM, após a última campanha de DCE (ANM, 2021).

Ainda, segundo a ANM (2021), as barragens que não emitiram DCE foram automaticamente interditadas e subiram no ranking de planejamento de fiscalização da ANM, de modo que passam a ser priorizadas para fiscalização.

Em relação à campanha anterior, o relatório da ANM (2021) aponta que o quantitativo de barragens interditadas se manteve em 43, ainda que constatado o aumento das DCE atestando a estabilidade (404 barragens na campanha de setembro de 2021 e 395 barragens na campanha anterior), mas não houve variação percentual das DCE positivas, visto que houve aumento no número de estruturas enquadradas na PNSB. Das 43 barragens de mineração interditadas, 36 estão compreendidas em Minas Gerais, 1 no Pará, 1 no Amapá, 4 no Mato Grosso e 1 no Rio Grande do Sul. Entre essas estruturas, 29 já se encontravam interditadas desde a campanha de setembro de 2020, enquanto as demais foram alvo de interdição na presente campanha.

Desta forma, entende-se que Minas Gerais possui o maior número de barragens com a estabilidade não atestada. Além disso, as barragens com nível de emergência máximo, NE3, também estão contidas no estado de Minas Gerais.

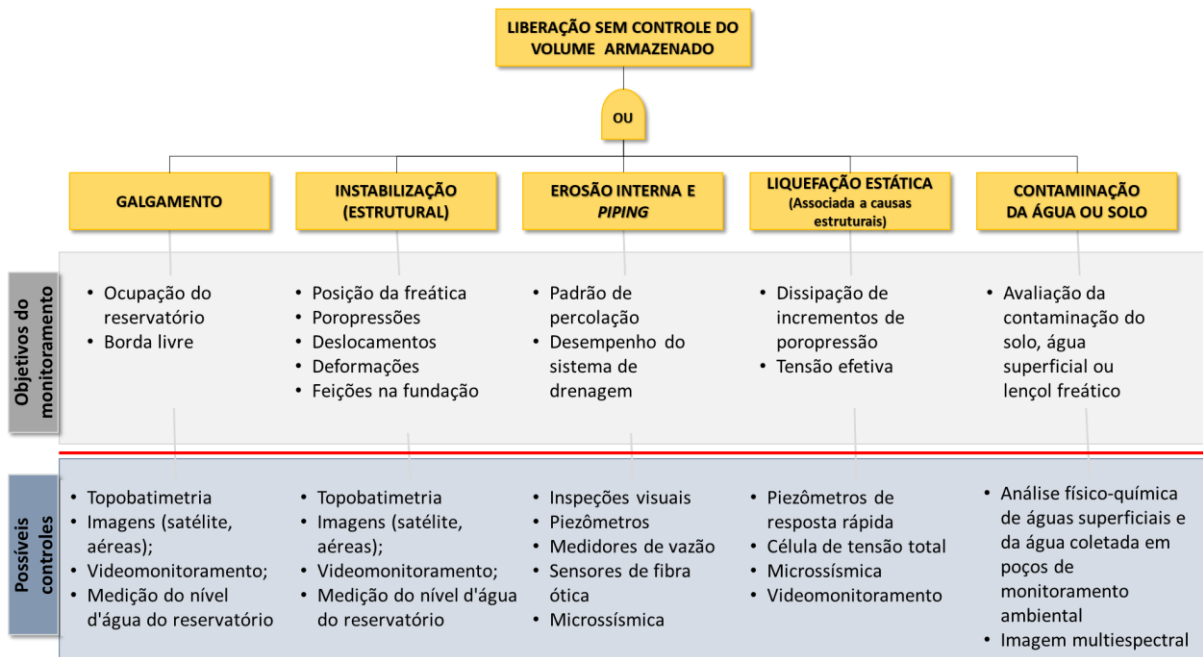
2.8 ESTUDO DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE BARRAGENS

2.8.1 Mecanismos de Ruptura

Para um estudo de *Dam Break* é necessário determinar o modo de falha no qual poderá ocorrer a ruptura. Falha é a incapacidade de um componente executar a função para a qual foi planejado (HARTFORD, 1999). Dessa forma, modo de falha é a maneira como uma falha pode ocorrer.

Modo de falha potencial é definido por Cyganiewicz e Smart (2000) como uma inadequação ou defeito existente, originado de uma condição construtiva natural, do projeto da barragem ou de suas estruturas, da construção, dos materiais constituintes, da operação e da manutenção ou de processos de envelhecimento, que pode levar a uma incontrolável liberação do reservatório, Figura 18.

Figura 18 – Mecanismos de ruptura.



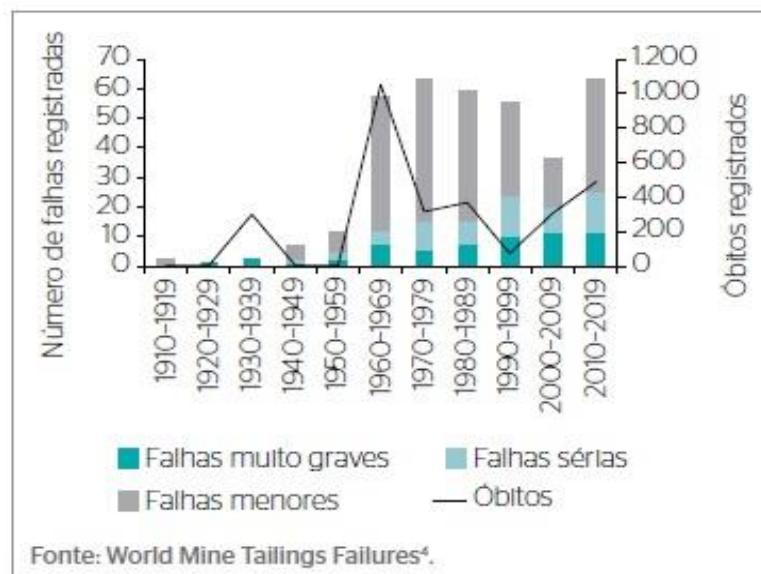
Fonte: Autora

Os modos de falhas são os mecanismos pelo qual uma barragem pode romper. São eles:

- Estrutural;
 - Terremoto (liquefação dinâmica);
 - Liquefação estática;
 - Fundação;
 - Subsidência;
 - Instabilidade de taludes;
 - Deslizamentos e erosões;
 - Diversas.
- Erosão interna e *piping*; e
- Galgamento.

As análises realizadas nas últimas três décadas indicam que, há um crescimento das falhas registradas principalmente a partir da década de 1960 e o crescimento das falhas graves e muito graves a partir dos anos 1980, em concordância com a Figura 19. (ROCHE; THYGESEN; BAKER, 2017)

Figura 19 – Históricos das falhas ocorridas no período de 1910 à 2019



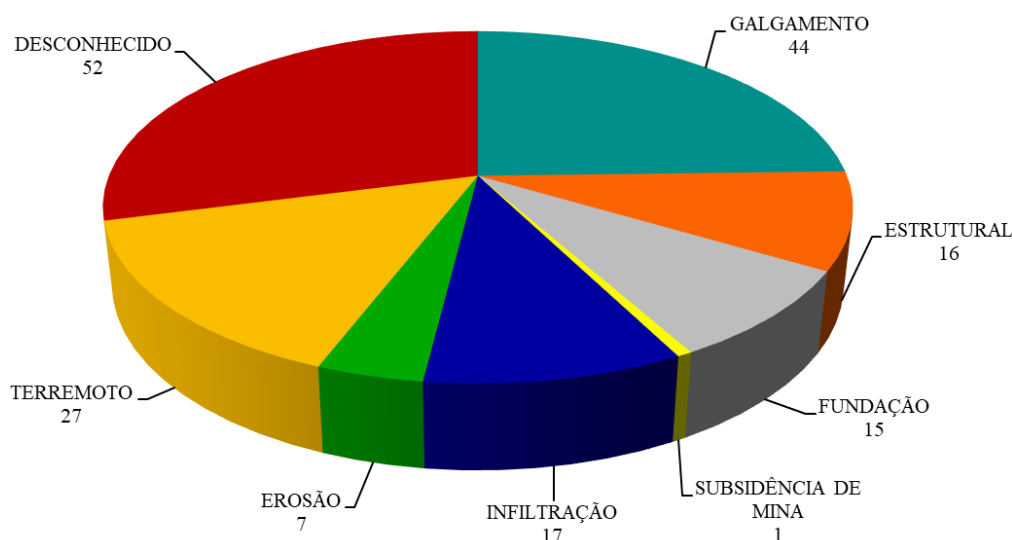
Fonte: Adaptado de Freitas e Silva (2019).

A Figura 20 mostra a incidência e as causas de falhas em barragens ocorridas entre 1915 e 2016. São elas:

- **Galgamento** (água fluindo por cima da estrutura): As barragens são compostas por materiais erodíveis e o galgamento causará a erosão dessa estrutura;
- **Estruturais** (inadequações estruturais, decantações inadequadas ou falhadas): Erros de projeto ou falha de um componente projetado para funcionar conforme projetado. Falhas de decantação (que drenam a água dos represamentos) são uma causa comum;
- **Fundação** (condições estruturais e de fundação, fundações com investigações insuficientes): Falha relacionada à construção da barragem em uma superfície que não fornece suporte suficiente para o peso da barragem. Um exemplo é uma camada de argila sob uma barragem;
- **Instabilidade de talude** (falha estática): Uma carga constante que causa deformação, até o ponto em que uma barragem rompe parcial ou completamente. Muitas vezes causada pela saturação parcial de áreas da barragem que são projetadas para permanecerem secas;
- **Terremoto** (instabilidade sísmica): As barragens são projetadas para resistir a terremotos, mas se o terremoto for maior do que o previsto, a estrutura pode ser destruída pelo tremor;
- **Erosão** (erosão externa): Erosão simples de uma face de barragem, normalmente devido ao escoamento de precipitação que não é reparado;

- **Infiltração** (infiltração e erosão interna): Erosão do material da barragem devido à passagem de água pelas áreas da barragem que são projetadas para permanecerem secas;
- **Subsidência de mina:** Se a barragem ou represamento for construído acima de uma mina subterrânea, o colapso do funcionamento da mina subterrânea pode levar à liberação dos rejeitos retidos;
- **Desconhecido:** Muitas das falhas de barragens mais antigas que não foram suficientemente documentadas podem se enquadrar nessa categoria.

Figura 20 - Causas das falhas de barragens de rejeitos entre 1915 e 2016



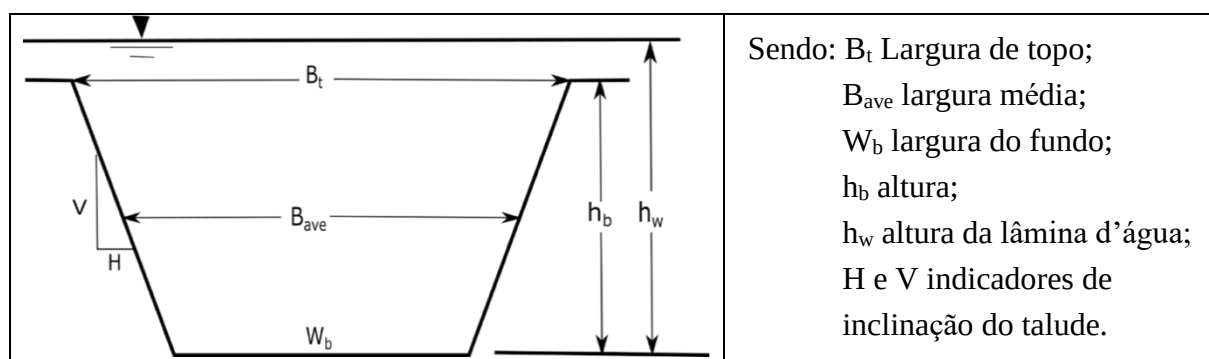
Fonte: Adaptado de Roche; Thygesen; Baker (2017).

2.8.2 Definição dos parâmetros da brecha

Conforme Almeida (2021), uma brecha é a abertura na estrutura da barragem que implicará a liberação do material do reservatório, produzindo a onda de inundação, caracterizada pelo hidrograma de ruptura.

Os parâmetros utilizados para definição da brecha de ruptura estão correlacionados à sua geometria e tempo de formação. Esses parâmetros podem ser determinados por meio de equações empíricas, modelos paramétricos ou modelos de erosão baseados em métodos físicos (USACE, 2014). Froehlich e Tufail (2004) constataram, com base em dados históricos, que o formato das brechas mais frequente é trapezoidal, conforme indicam os parâmetros representados na Figura 21.

Figura 21 - Parâmetros de abertura da brecha



Fonte: Adaptado de USACE, 2014.

As definições da largura e tempo de formação da brecha são feitas com base em uma análise de sensibilidade dos modelos empíricos presentes na literatura – Froehlich (1995 e 2008), MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun e Gillette (1990) e Washington State. O Quadro 4 apresenta um resumo das equações de previsão de brecha apresentadas nesses estudos.

Quadro 4 - Principais equações de previsão dos parâmetros de brecha disponíveis na literatura

Referência das equações de previsão	Parâmetros da brecha		
	Largura média da brecha	Inclinação do talude lateral (z)	Tempo de formação da brecha - t_f (h)
Froehlich (1995)	$0,1803k_0 V_w^{0,32} \times H_b^{0,19}$	0,7 para <i>piping</i>	$0,00254 V_w^{0,53} \times H_w^{-0,90}$
Froehlich (2008)	$0,27k_0 V_w^{0,32} \times H_b^{0,04}$	1,0 para galgamento	$63,2 \times (V_w / g H_b^2)^{1/2}$
MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	Não se aplica	2,0	$0,0179(0,0261(V_w \times H_w)^{0,769})^{0,364}$
Von Thun e Gillette (1990)	$2,5H_w + C_b$	0,7 para <i>piping</i> 1,0 para galgamento	$0,020H_w + 0,25$ ou $B / 4H_w$ (solo resistente à erosão)
			$0,0015H_w$ ou $B / 4 H_w + 61,0$ (solo altamente erodível)

Nota:

k_0 : Fator de modo de falha (1,0 para *piping*; 1,3 para galgamento);

V_w : Volume do reservatório no momento da ruptura (m^3);

H_b : Altura da brecha (m);

H_w : Altura da lâmina de água no momento da ruptura (m);

C_b : • 6,1 se $V_w < 1,23 \times 10^6 m^3$;

• 18,3 se $1,23 \times 10^6 < V_w < 6,17 \times 10^6 m^3$;

• 42,7 se $6,17 \times 10^6 < V_w < 1,23 \times 10^7 m^3$;

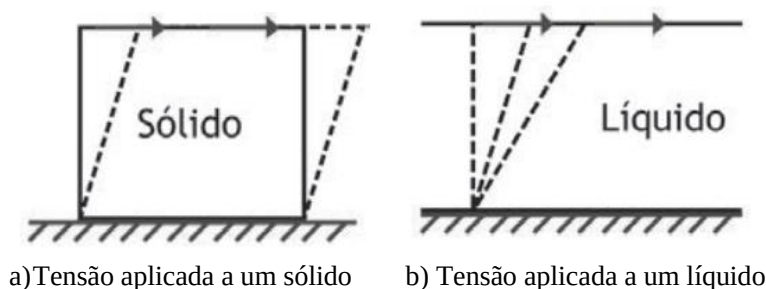
• 54,9 se $V_w > 1,23 \times 10^7 m^3$.

2.9 MECÂNICA DOS FLUIDOS

Para a mecânica dos fluidos, toda matéria encontra-se somente em dois estados: fluido e sólido. A distinção desses estados está relacionada ao seu comportamento quando aplicada uma tensão de cisalhamento ou tangencial (KWONG, 2010).

Kwong (2010) afirma que o sólido pode resistir a uma tensão de cisalhamento por uma deformação estática ou pode quebrar completamente, sendo a deformação proporcional à força, ilustrado na Figura 22 a. No entanto, qualquer tensão de cisalhamento aplicada a um fluido, é suficiente para gerar sua movimentação, conforme Figura 22 b. No estado líquido, a substância altera continuamente sua forma (escoa), enquanto a tensão de cisalhamento permanecer aplicada, e a velocidade do escoamento aumenta de acordo com a intensidade da força aplicada.

Figura 22 - Aplicação de uma tensão de cisalhamento



Fonte: Kwong, 2010

De acordo com Kwong (2010), os fluidos ainda podem ser divididos em duas classes distintas: os líquidos e os gases. O líquido, é composto por moléculas relativamente agrupadas com forças coesivas fortes, o que faz com que seu volume se mantenha e forma uma superfície livre em um campo gravitacional se sua parte superior não estiver confinada. Além disso, os líquidos são incompressíveis devido sua resistência à redução do volume próprio.

Já o gás possui suas moléculas amplamente espaçadas, com forças coesivas desprezíveis, o que o torna um fluido livre para se expandir até ocupar todas as partes do recipiente que o contém. Ao contrário dos líquidos, os gases são considerados compressíveis, devido sofrerem redução do volume próprio se submetidos à uma força. (KWONG, 2010)

2.9.1 Viscosidade

A massa específica e o peso específico são propriedades que indicam o “peso” de um fluido. Contudo, somente essas propriedades não são suficientes para caracterizar o comportamento dos fluidos. Por essa razão, é necessária uma propriedade adicional para descrever a “fluidez” das substâncias. Essa propriedade é denominada viscosidade (μ). Por conseguinte, a taxa de deformação de um fluido é diretamente ligada à viscosidade do fluido.

Dessa forma, para uma determinada tensão, um fluido altamente viscoso terá deformação menor que um fluido de baixa viscosidade. (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 2004)

Durante o escoamento de um fluido, existem duas forças que atuam na substância, as forças de campo, que atuam sem contato físico (força gravitacional ou peso, força eletrostática) e as forças de superfície, que precisam de contato físico para transmissão (pressão, força de atrito). Ainda, as forças de superfície podem ser divididas em duas componentes: componentes tangenciais (cisalhamento) e componentes normais (compressão).

2.9.2 Lei da Viscosidade de Newton

Para fluidos newtonianos, a tensão de cisalhamento – τ (força aplicada por unidade de área da placa, necessária para manter a velocidade constante) é proporcional a Δu e inversamente proporcional a Δy , conforme eq. (1):

$$\tau \propto \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad \text{ou} \quad \tau \mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1)$$

Sendo, μ a viscosidade média em Δy .

Como u geralmente não varia linearmente com y , assume-se que $\Delta y \rightarrow 0y$, eq. (2):

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \rightarrow \text{Lei de Newton da viscosidade} \quad (2)$$

Em síntese, viscosidade é uma medida da resistência do fluido ao cisalhamento quando o fluido se move, já que, diferente do sólido, um fluido não é capaz de resistir ao cisalhamento sem se mover.

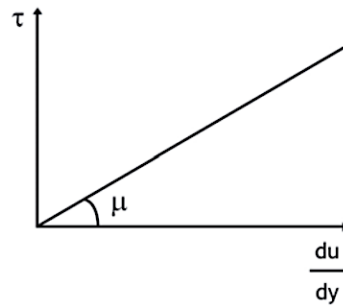
2.9.3 Reologia dos Fluidos

A reologia é um campo da ciência que estuda a deformação e o escoamento dos materiais. Os fluidos que obedecem a relação $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ são denominados fluidos newtonianos.

Ou seja, apresentam relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação por cisalhamento, Figura 23. A maioria dos fluidos comuns, líquidos e gases, são newtonianos. (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 2004)

A relação $\tau \times \underbrace{\frac{du}{dy}}_{\text{velocidade de cisalhamento}}$ é linear.

Figura 23 - Tensão de cisalhamento x velocidade de cisalhamento

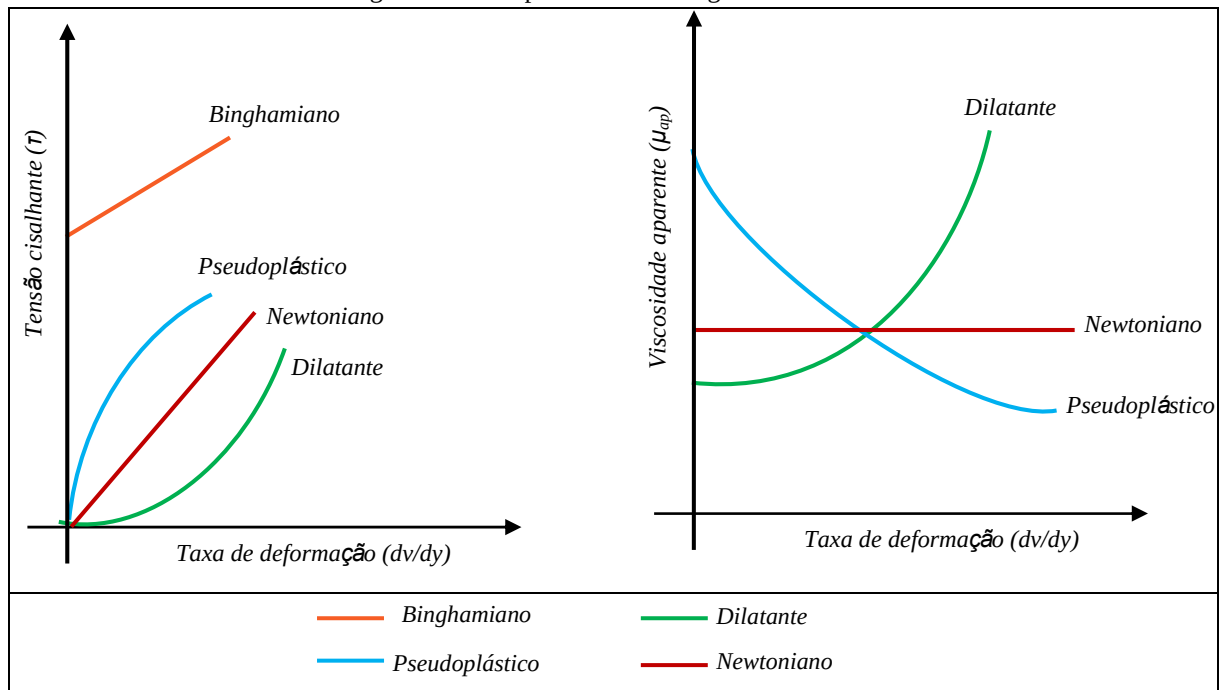


Fonte: Kwong, 2010

Os fluidos que apresentam essa relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não linear, são denominados fluidos não-newtonianos. A Figura 24 mostra o comportamento dos fluidos não-newtonianos mais simples e comuns, devido a existência de fluidos não-newtonianos com outros tipos de comportamentos.

Conforme Munson, Young e Okiishi (2004), a inclinação da curva tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação por cisalhamento é denominada viscosidade dinâmica aparente (μ_{ap}). Observa-se na que, para fluidos newtonianos μ_{ap} é igual a μ e independe da taxa de cisalhamento.

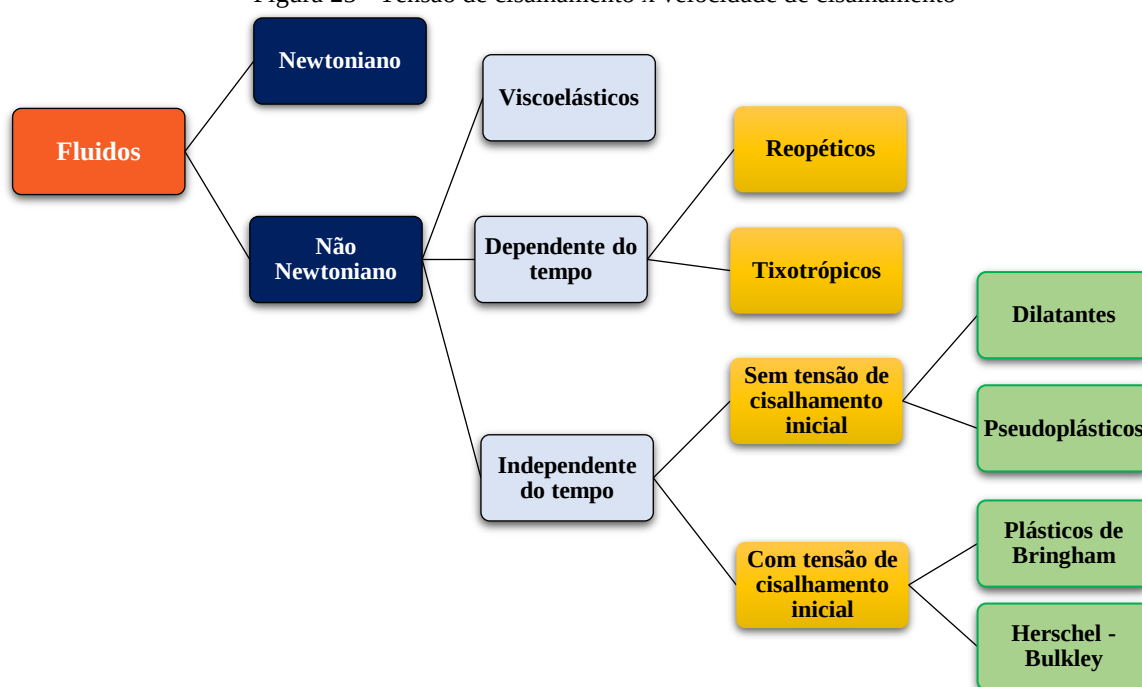
Figura 24 - Comportamento reológico dos fluidos



Fonte: Adaptado Galindo (2013) apud Fox & McDonald (1998)

Ainda, Galindo (2013) afirma que os fluidos não-newtonianos podem ser classificados em: viscoelásticos, dependentes e independentes do tempo, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Tensão de cisalhamento x velocidade de cisalhamento



Fonte: FREIRE, 2012

Para estabelecer um modelo matemático que melhor represente as relações entre a tensão e a taxa de cisalhamento para fluidos, independentes do tempo, tem-se desenvolvido algumas relações empíricas. O Quadro 5, apresenta algumas dessas equações. (GALINDO, 2013).

Quadro 5 - Equações, modelos e parâmetros reológicos para fluidos não newtonianos

Modelo	Equação	Parâmetros
Newton	$\tau = \mu \gamma$	μ - viscosidade absoluta γ - taxa de cisalhamento
Bingham	$\tau = \mu_{ap} \gamma + \tau_0$	μ_{ap} - viscosidade aparente τ_0 - tensão de escoamento γ - taxa de cisalhamento
Ostwald	$\tau = K \gamma^\eta$	K - índice de consistência η - índice de comportamento γ - taxa de cisalhamento
Herschell-Buckley	$\tau = K \gamma^\eta + \tau_0$	K - índice de consistência η - índice de comportamento γ - taxa de cisalhamento τ_0 - tensão de escoamento

Fonte: Galindo (2013) apud Adaptado de Machado (2002)

2.9.4 Propagação do Material do Reservatório à Jusante

O escoamento a ser propagado à jusante da barragem de rejeitos que será objeto do estudo, é composto de água, rejeitos e sedimentos. Dessa forma, suas características são de um fluido não-newtoniano com tensão limite de escoamento. O'Brien e Julien (1984) apresentam

relações de concentração volumétrica de sólidos (C_v) para fluidos não-newtonianos, para avaliação da propensão ao tipo de escoamento que determinado material, ao ser mobilizado, irá se adequar, conforme o Quadro 6. Quanto maior for o teor de sólidos presente no fluido, maior será sua viscosidade, variando as características do escoamento.

Quadro 6 - Caracterização de escoamentos em função da concentração de sólidos

Características do escoamento	Concentração volumétrica de sólidos - C_v	Teor de sólidos em massa – TS	Descrição do escoamento
Escorregamento	0,53 a 0,90	0,75 a 0,96	Não há escoamento
	0,50 a 0,53	0,72 a 0,75	Deformações internas e movimento lento devido às tensões
Mudflow	0,48 a 0,50	0,71 a 0,72	Escoamento evidente, apesar de lento; Deformações plásticas sem espraçamento sobre as superfícies adjacentes.
	0,45 a 0,48	0,68 a 0,71	Início de espraçamentos, apesar da atuação de forças coesivas.
Mudflood	0,40 a 0,45	0,64 a 0,68	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	0,59 a 0,64	Acentuada sedimentação; Alastra-se quase por completo sobre superfícies horizontais; Identificação de duas fases (fase líquida aparece); Ondas se propagam por distâncias consideráveis.
	0,30 a 0,35	0,53 a 0,59	Separação de água na superfície; Ondas propagam-se com facilidade; Decantação de partículas granulares.
	0,20 a 0,30	0,40 a 0,53	Ação de ondas distinta; Superfície fluida; Todas as partículas foram decantadas.
Escoamento aquoso	< 0,20	< 0,40	Inundação provocada por propagação de onda no estado líquido com descarga de sedimentos suspensos.

* Foi considerada a massa específica dos sólidos igual a 2.778 kg/m³

Fonte: O'Brien e Julien, 1984.

2.10 TIPOS DE ESCOAMENTO E SUA CLASSIFICAÇÃO

Os tipos de escoamento podem ser classificados de acordo com o tempo e o espaço (CHOW, 1959). Segundo Porto (2006), em relação ao tempo, o escoamento pode ser classificado como permanente, quando as principais características do regime em uma seção de análise não varia ao longo do tempo, ou como transiente, quando ocorre variação ao longo do tempo. Com relação ao espaço, os escoamentos podem ser classificados em uniforme, quando as principais características do regime se mantem constante ao longo do percurso principal do escoamento, ou variado.

Ainda, os escoamentos podem ser classificados quanto a relação entre forças viscosas e inerciais através do número de Reynolds (Re), conforme expressa a eq. (3) (WHITE, 2018):

$$Re = \frac{V * L}{\nu} \quad (3)$$

Onde, L é o comprimento e pode ser considerado o valor do raio hidráulico; e ν a viscosidade cinética do fluido. De acordo com este número, o escoamento é classificado em laminar ($Re < 500$) ou turbulento ($Re > 2000$). (PORTO, 2006)

Para caracterizar o escoamento são necessários os parâmetros geométricos da seção que, por sua vez, dependem da geometria do canal. Conforme Chow (1959), a geometria do canal intervém na disseminação da velocidade ao longo do trecho de escoamento.

Para Chow (1959), o escoamento permanente uniforme, identificado pela profundidade e velocidades constantes ao longo das seções, é o tipo de escoamento que permite determinar com facilidade a velocidade do escoamento, com fórmulas consagradas como a de Chézy e *manning*.

2.10.1 Equação de *Manning*

Segundo White (2018), existem diversas fórmulas para o cálculo do coeficiente de Chézy que o relacionam ao raio hidráulico da seção. A fórmula de *manning* para o escoamento, eq. (4), é apresentada a seguir.

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * I_0^{1/2} \quad (4)$$

Onde n é o coeficiente adimensional de rugosidade de *manning*;

I_0 a declividade de fundo do canal.

Os valores para o coeficiente de *manning* são tabelados, ainda assim sua determinação e caracterização das condições de contorno para as simulações de escoamento, podem atribuir erros aos resultados devido sua subjetividade (CHOW, 1959; MROKOWSKA *et al.*, 2015).

2.10.2 Coeficiente de Rugosidade de *Manning*

Segundo Porto (2006), a fórmula de *manning* é a mais utilizada e seu coeficiente n é especificado em quadros (Quadro 7) e não com base na rugosidade absoluta equivalente, ε , medida em campo. Para determinar o coeficiente de *manning* ao longo do canal, utiliza-se a eq. (5) a seguir, dada por Cowan (1944) apud Chow (1959).

$$N = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3) * m_5 \quad (5)$$

onde, n_0 é o valor básico de n para um canal reto, uniforme e liso, livre de materiais naturais;

n_1 é o valor adicional a n_0 para correção dos efeitos das superfícies irregularidades;

n_2 é um valor das variações de forma e tamanho do canal ao longo da seção;

n_3 é o valor para obstruções;

n_4 é o valor para a vegetação e condições de escoamento;

m_5 é um fator de correção das sinuosidades do canal.

Quadro 7 - Valores para a computação do coeficiente de *manning*

Condições do Canal		Valores	
Material Envolvido	Terra	n_0	0.020
	Rocha Cortada		0.025
	Cascalho Fino		0.024
	Cascalho Grosso		0.028
Grau de Irregularidade	Liso	n_1	0.000
	Insignificante		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variedades na Seção Transversal	Gradual	n_2	0.000
	Alternado Ocasionalmente		0.005
	Alternado Frequentemente		0.010-0.015

Quadro 7 - Valores para a computação do coeficiente de *manning*

Condições do Canal		Valores	
Efeito Relativo das Obstruções	Desprezível	n_3	0.000
	Insignificante		0.010-0.015
	Apreciável		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetação	Baixa	n_4	0.005-0.010
	Média		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muito Alta		0.050-0.100
Grau de Sinuosidade	Insignificante	m_5	1.000
	Apreciável		1.150
	Severa		1.300

Fonte: Chow, 1959

Outro método para estimar o coeficiente de rugosidade é através de ensaios realizados em campo, associados a diversos materiais e situações, e, que apresentam seus resultados de forma tabelada. Baptista e Coelho (2010) apresentam esses resultados conforme mostra o Quadro 8 e Quadro 9.

Quadro 8 - Coeficientes de rugosidade para canais naturais

Tipo	Características	Rugosidade		
		Mínima	Normal	Máxima
Canais de pequeno porte em planície ($B < 30\text{m}$)	Limpos	0,025	0,033	0,045
	Trechos lentos	0,050	0,070	0,080
Canais de pequeno porte em montanhas ($B < 30\text{ m}$)	Leito desobstruído	0,030	0,040	0,050
	Leito com matacões	0,040	0,050	0,070
Canais de grande porte ($B > 30\text{ m}$)	Seções regulares	0,025	-	0,060
	Seções irregulares	0,035	-	0,100
Planícies de inundação	Pastagens	0,025	0,030	0,035

Quadro 8 - Coeficientes de rugosidade para canais naturais

Tipo	Características	Rugosidade		
		Mínima	Normal	Máxima
	Culturas	0,020	0,040	0,050
	Vegetação densa	0,045	0,070	0,160

Fonte: Baptista e Lara, 2010.

Quadro 9 - Coeficientes de rugosidade para canais artificiais

Revestimento	Rugosidade		
	Mínima	Usual	Máxima
Concreto pré-moldado	0,011	0,013	0,015
Concreto com acabamento	0,013	0,015	0,018
Concreto projetado	0,018	0,020	0,022
Gabiões	0,022	0,030	0,035
Espécies vegetais	0,025	0,035	0,070
Aço	0,010	0,012	0,014
Ferro fundido	0,011	0,014	0,016
Aço corrugado	0,019	0,022	0,028
Solo sem revestimento	0,016	0,023	0,028
Rocha sem revestimento	0,025	0,035	0,040

Fonte: Baptista e Lara, 2010.

3 MODELOS DE SOFTWARES E SISTEMA DE GEOPROCESSAMENTO

Para a delimitação da área de estudo e obtenção do modelo digital do terreno (MDT), será fundamental o uso de ferramentas de geoprocessamento como QGIS e ARCGIS. Já o mapeamento das áreas de inundação, será gerado a partir da utilização dos hidrogramas de ruptura resultantes das simulações feitas no HEC-HMS como dados de entrada do modelo.

Neste contexto, emprega-se o uso de ferramentas GIS, associado a análise espacial e modelagem hidráulica, para elaborar os mapas da mancha de inundação em decorrência da ruptura da barragem no HEC-RAS.

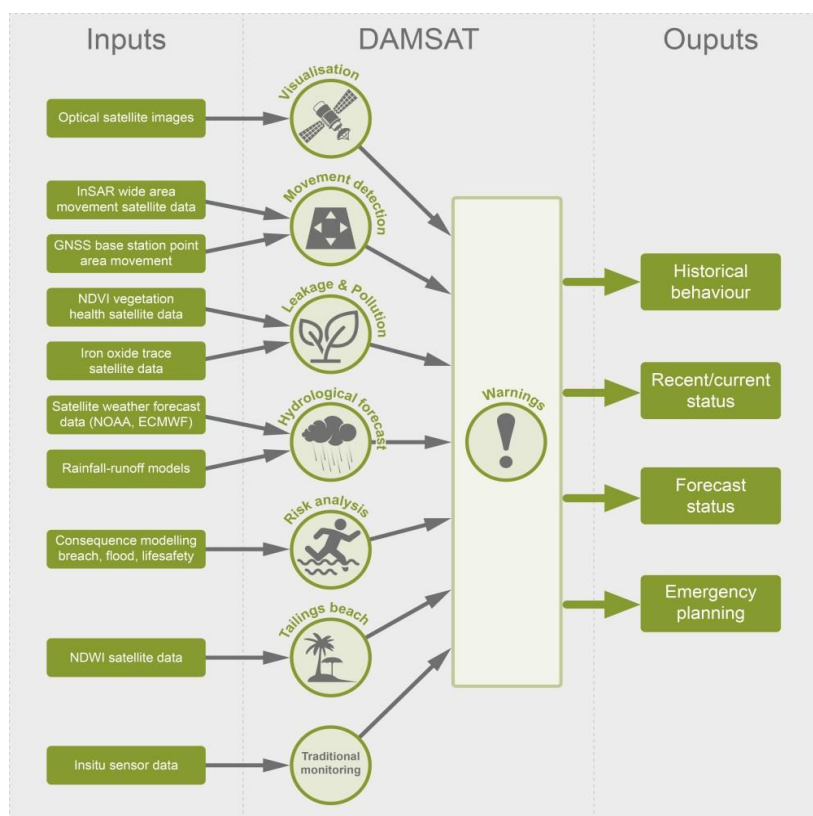
3.1 SISTEMA DAMSAT

O sistema DAMSAT, da HR Wallingford, utiliza a tecnologia via satélite para monitorar de forma remota barragens de água e rejeitos e outras instalações de armazenamento de rejeitos. O sistema fornece inteligência regular e precisa para apoiar o monitoramento remoto das estruturas de contenção. Desse modo, o DAMSAT é considerado como uma solução “*one stop*”, ou seja, é adaptado de forma personalizada para atender às necessidades de cada estrutura a ser monitorada (HR WALLINGFORD, 2022).

De acordo com o site do sistema, o desenvolvimento inicial do DAMSAT foi financiado pela Agência Espacial do Reino Unido no âmbito do Programa de Parceria Internacional (IPP). O IPP objetiva utilizar soluções espaciais para causar um impacto positivo e prático na vida das pessoas que vivem em economias emergentes e em desenvolvimento. O IPP é financiado pelo *Global Challenges Research Fund*, um fundo do Governo do Reino Unido que apoia a investigação de ponta e os pontos fortes da inovação para proporcionar benefícios econômicos e/ou sociais sustentáveis aos países emergentes e em desenvolvimento (HR WALLINGFORD, 2022).

Segundo a HR Wallingford (2022), o sistema DAMSAT é composto por uma coleção de módulos, conforme apresentado na Figura 26, que cobrem diferentes aspectos de uma barragem ou depósito de rejeitos, o que possibilita a adaptação do DAMSAT para atender às necessidades individuais de cada barragem. Os módulos são montados de acordo com as necessidades de cada implementação, que podem ou não variar, para atender à situação local e aos requisitos específicos para cada estrutura.

Figura 26 - Módulos do sistema DAMSAT.



Fonte: HR Wallingford, 2022

3.1.1 EMBREA-MUD

O EMBREA-MUD é um *software* desenvolvido pela HR Wallingford com o objetivo de preencher a lacuna que surgiu durante o desenvolvimento do DAMSAT² no decorrer da fase de análise dos potenciais impactos associados ao rompimento de barragens de rejeitos.

O *software* é um dos módulos do sistema DAMSAT e é uma ferramenta de modelagem de ruptura de dois componentes que simultaneamente leva em consideração as saídas de água e rejeitos. Além disso, o *software* é capaz de representar a erosão do material da barragem tanto pela água quanto pelos rejeitos, a erosão dos rejeitos pela água, bem como as forças dinâmicas entre a água e a camada de rejeitos.

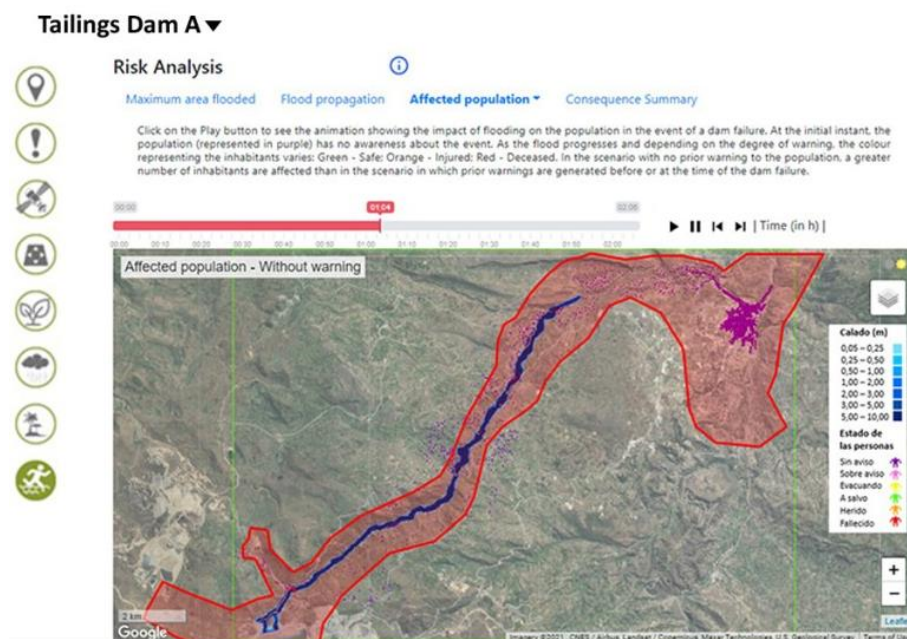
A função do EMBREA-MUD é proporcionar aos usuários o desenvolvimento de planos de emergência e melhorar sua compreensão dos riscos a jusante se ocorrer uma falha da barragem. Os dados de análise de risco consideram a simulação da vazão para barragens de água ou rejeitos se houver uma ruptura, sua disseminação a jusante (Figura 27) e como isso

² Software que utiliza da tecnologia via satélite para monitorar remotamente barragens de água e rejeitos. O sistema propõe reduzir o risco de falha dessas estruturas e consequentemente o risco para a população e danos ao meio ambiente.

impacta as pessoas que vivem na área de risco. Um conjunto de modelos relacionados a consequências é usado para criar essas simulações. Com essas informações, também são quantificadas estimativas de danos econômicos e ambientais. Os modelos de risco podem fornecer informações sobre:

- Extensão da inundação no vale a jusante, incluindo profundidades de água e velocidade de fluxo;
- Danos econômicos decorrentes do cenário de rompimento da barragem;
- Perda de vidas resultante de um cenário de rompimento de barragem em diferentes cenários de “aviso à população”;
- Classificação dos danos ambientais decorrentes de um cenário de rompimento de barragem.

Figura 27 - Simulação da mancha de inundação de uma barragem.



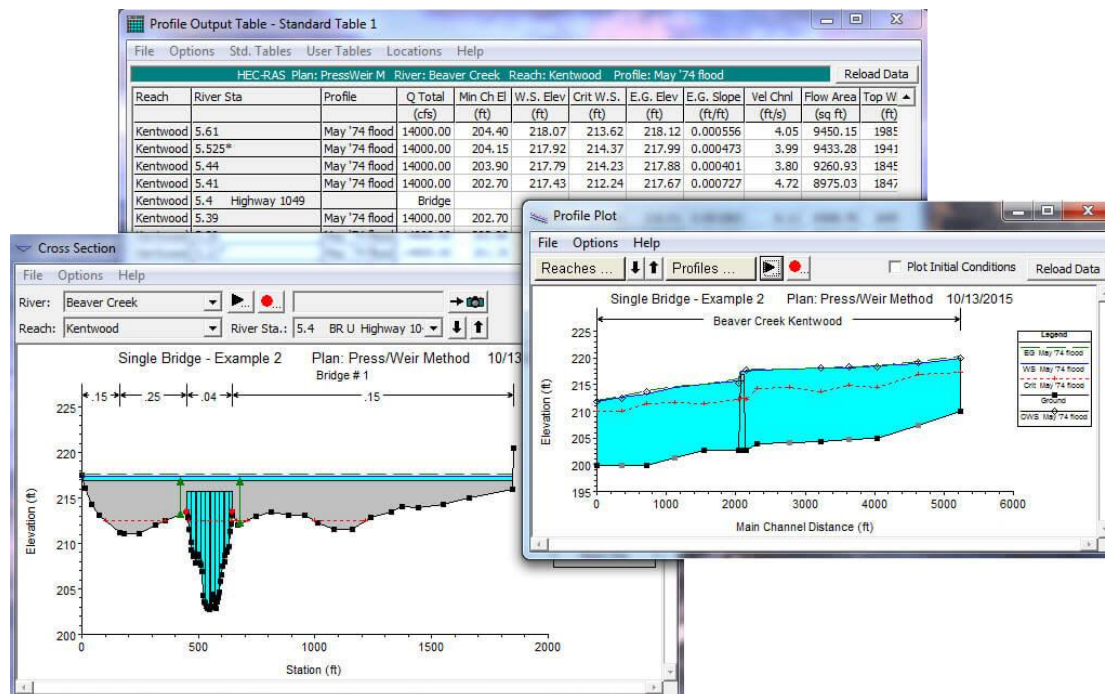
Fonte: HR Wallingford, 2022

3.2 HEC-RAS

O HEC-RAS 6.3.1 é um *software* gratuito criado pelo Corpo de Engenharia do Exército Norte Americano (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis Systems*) capaz de realizar cálculos unidimensionais de escoamento em regime permanente e não permanente, transporte de sedimentos, modelagem de cabeceiras e análise da temperatura da água. Para isso, as equações de escoamento são baseadas unicamente na fórmula da resistência de *manning*, dispensando a aplicação de teorias mais complexas, Figura 28 (HEC, 2023). Conforme HEC (2023), as atualizações implementadas nas versões recentes dessa ferramenta incluem

algoritmos para modelar rupturas de barragens que consideram o alargamento da brecha ao longo do tempo.

Figura 28 - Gráficos e relatórios gerados no HEC-RAS.



Fonte: HEC, 2023.

Para a propagação da onda de cheia e mapeamento de variáveis hidráulicas na planície de inundações em duas dimensões o HEC-RAS admite a resolução das equações de conservação de massa e conservação de quantidade de movimento com o modelo de águas rasas. As equações são resolvidas pelo método de volumes finitos, segundo combinações de métodos matriciais e aproximações sucessivas, onde as direções de fluxo potenciais correspondem ao plano bidimensional (MELO, 2022).

A construção do modelo bidimensional no HEC-RAS é composta da associação de uma malha 2D (*grid*) ao Modelo Digital de Elevação (MDE) onde cada célula do grid obtém dados de rugosidade e de elevação (USACE, 2021).

As equações de escoamento bidimensional não-newtoniano do HEC-RAS são as equações de águas rasas (*Shallow Water Equations - SWE*) e a equação de onda de difusão. De forma conservadora, as simulações de inundações em decorrência de rompimentos de barragens devem ser realizadas preferencialmente com as equações de águas rasas. As equações de águas rasas no HEC-RAS para a propagação da onda de cheia a partir do escoamento de fluidos não-newtonianos são resolvidas em duas dimensões (HERGARTEN e ROBL, 2015 *apud* USACE, 2020).

A definição do modelo reológico matemático mais adequado para descrever o escoamento de um fluido não-newtoniano depende das características do escoamento (MELO, 2022). Segundo Usace (2020), no HEC-RAS a definição do modelo reológico utilizado é classificada em quatro tipos de escoamentos não-newtonianos: fluxo hiperconcentrado, fluxo de lama e detritos, avalanche de neve e fluxo clástico, sendo:

- (1) fluxo hiperconcentrado, quando $C_v > 5\%$ e existe tensão de escoamento e perdas viscosas;
- (2) fluxo de lama, quando há turbulência entre partículas;
- (3) fluxo de detritos, quando o número de Bagnold (NBAG), razão entre a tensão inercial do grão e a tensão de cisalhamento viscosa, é maior que 40 e ocorre colisão entre grãos; e
- (4) fluxo clástico, quando o número de atrito (Nfri), razão da tensão de atrito entre grãos pela tensão de cisalhamento viscosa, é superior a 100 e o processo de perda interna do material é uma matriz rígida.

Mediante o exposto, o HEC-RAS recomenda os modelos matemáticos mais adequados para representar o comportamento da mistura sólido-água (USACE, 2020; GIBSON *et al.*, 2020): o modelo de Bingham para o fluxo hiperconcentrado, os modelos O'Brien (Quadratic) e Generalized Herschel-Bulkley para o fluxo de lama e de detritos, e o modelo Clastic-Grain Flow (modelo geotécnico de Mohr-Coloumb) para o fluxo clástico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

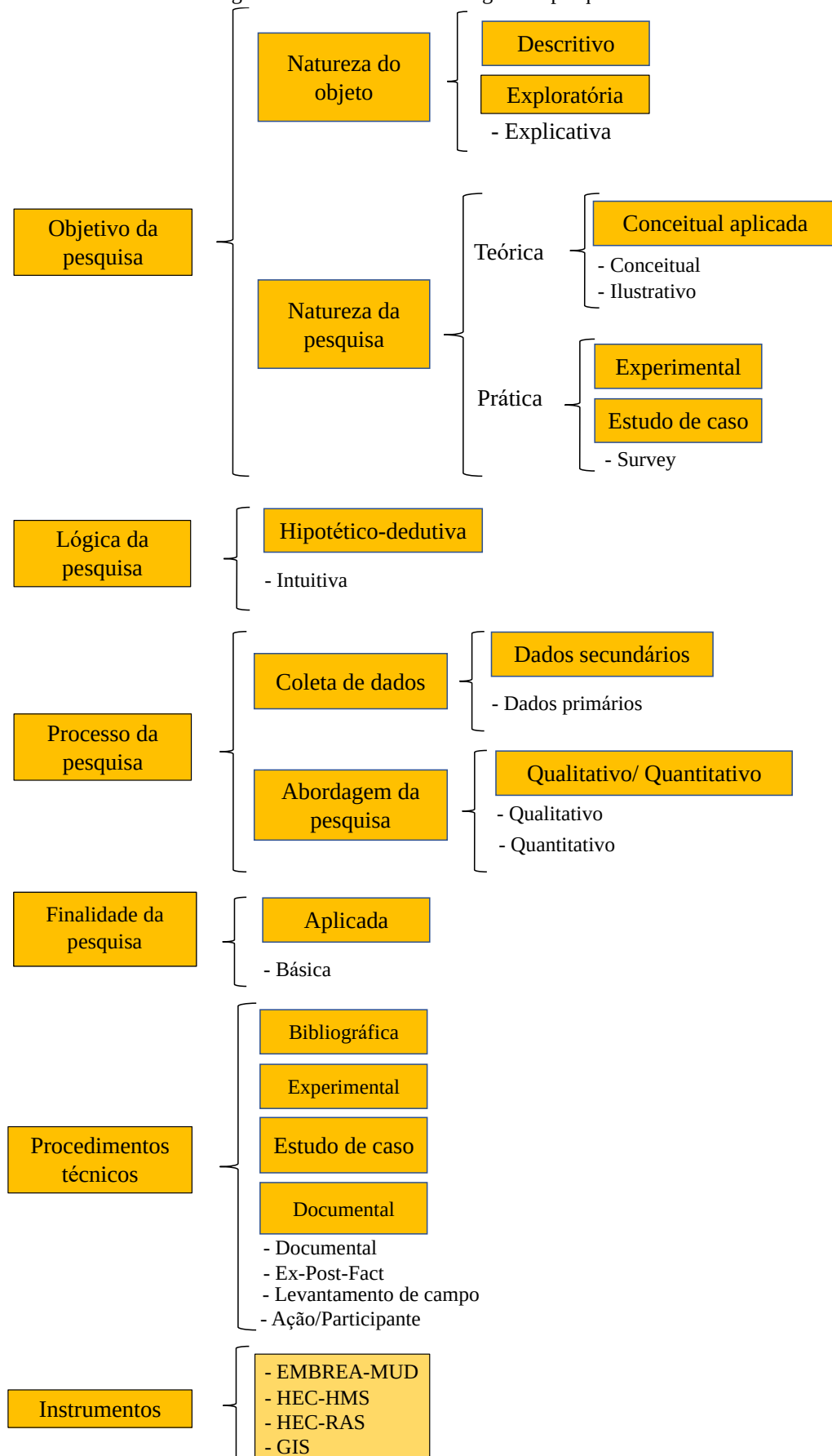
O trabalho pode ser classificado como uma pesquisa de natureza aplicada e interdisciplinar, devido a pluralidade de disciplinas e a integração de conhecimentos geotécnicos e hidrológicos, que aspiram desenvolver uma aplicação prática para a análise e interpretação de um estudo de caso. Quanto à forma de abordagem, a pesquisa classifica-se como qualitativa-quantitativa (quali-quantitativa), em virtude da coleta de dados históricos obtidos previamente por meio do aprofundamento bibliográfico e do conhecimento seguido da aplicação numérica probabilística. A avaliação do uso e ocupação do solo foi determinada a partir de valores predefinidos do coeficiente de rugosidade para fluidos newtonianos e aplicação do modelo de Bingham para fluidos não-newtonianos. Os resultados obtidos foram versados por meio de análises estatísticas. O método selecionado para o desenvolvimento da pesquisa, foi o hipotético-dedutivo, uma vez que existem ideias provenientes de um conhecimento prévio, que tem por finalidade explicar o objeto de estudo e favorecer a formação e investigação de hipóteses sobre o problema observado.

Tendo em vista a solução da pergunta de pesquisa, os objetivos traçados classificam-na como descritiva e exploratória, pois inicialmente realizou-se um levantamento de informações referentes ao reservatório, barramento e área à jusante da barragem, para ampliação do conhecimento. Os dados obtidos foram trabalhados com equações e inferências segundo o entendimento geotécnico, hidrológico e fundamentos de mecânica dos fluidos.

Para atingir os objetivos propostos, os métodos de procedimentos empregados durante a pesquisa foram a pesquisa documental, bibliográfica, experimental e estudo de caso. A relação de informações referentes à região do reservatório, consultas ao referencial teórico e a análise do estado do conhecimento, corroboram para essa classificação da pesquisa. Os dados catalogados foram aplicados em simulações de rompimento hipotético da barragem em cenários distintos, observando a interferência da variação do coeficiente de rugosidade, em decorrência do tipo de fluido, nas áreas atingidas pela mancha de inundação, o que determina a classificação experimental e o estudo de caso.

A Figura 29 mostra os métodos de abordagem e procedimento adotados durante a pesquisa.

Figura 29 - Métodos de abordagem da pesquisa.



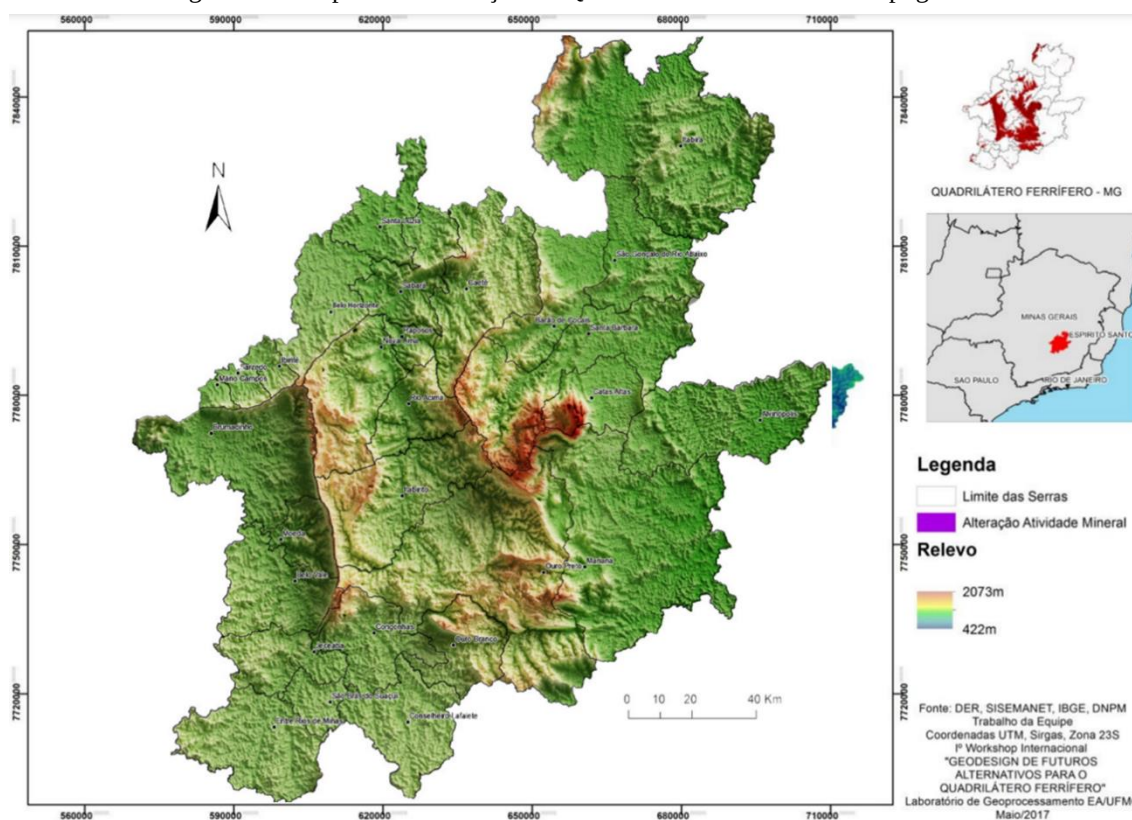
Fonte: Autora.

4.1 SELEÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

A barragem de rejeito objeto de estudo, pertence ao espaço amostral ilustrado no mapa da Figura 30. A seleção da estrutura foi definida por meio do cálculo probabilístico dos dados históricos de rupturas e falhas de barragens de rejeitos levantados nos bancos de dados dos órgãos competentes, a fim de assimilar o modo de falha e ruptura de maior recorrência e que apresenta um nível de segurança crítico, ou seja, nível de emergência 3.

Desse modo, a estrutura escolhida é uma barragem de aterro construída pelo método por montante, com a finalidade de armazenar rejeitos de minério de ferro, que está localizada em Minas Gerais na região do quadrilátero ferrífero. O nome e localização exata do barramento não interfere nos resultados e, foi omitido por questões de confidencialidade por parte do empreendimento.

Figura 30 – Mapa de Localização do Quadrilátero Ferrífero com Topografia.

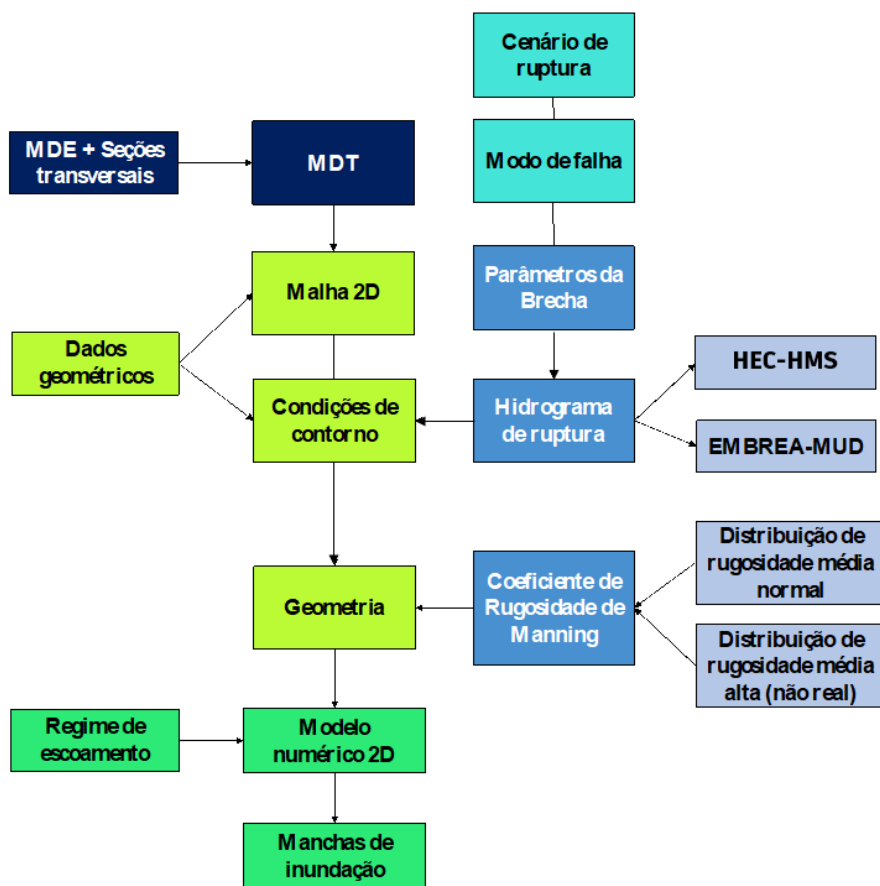


Fonte: Adaptado de Casagrande, Moura e Parisi (2018) e Moura *et al.* (2022).

4.2 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

Após a definição do local de estudo, foram gerados os hidrogramas de ruptura no HEC-HMS e EMBREA MUD. Em sequência foram realizadas simulações do modelo hidrodinâmico no HEC-RAS, elaboração dos mapas de inundação dos cenários simulados e a análise estatística dos resultados conforme a variação do fluido e do coeficiente de *manning*, Figura 31.

Figura 31 - Fluxograma do processo.



Fonte: Autora.

Destaca-se que, para as simulações do modelo hidrodinâmico no HEC-RAS utilizou-se apenas o hidrograma de ruptura gerado no HEC-HMS.

4.3 HIDROGRAMA DE RUPTURA

O hidrograma de ruptura foi construído com o software HEC-HMS (v 4.11) (USACE, 2023) e EMBREA-MUD Pro (HR WALLINGFORD, 2022).

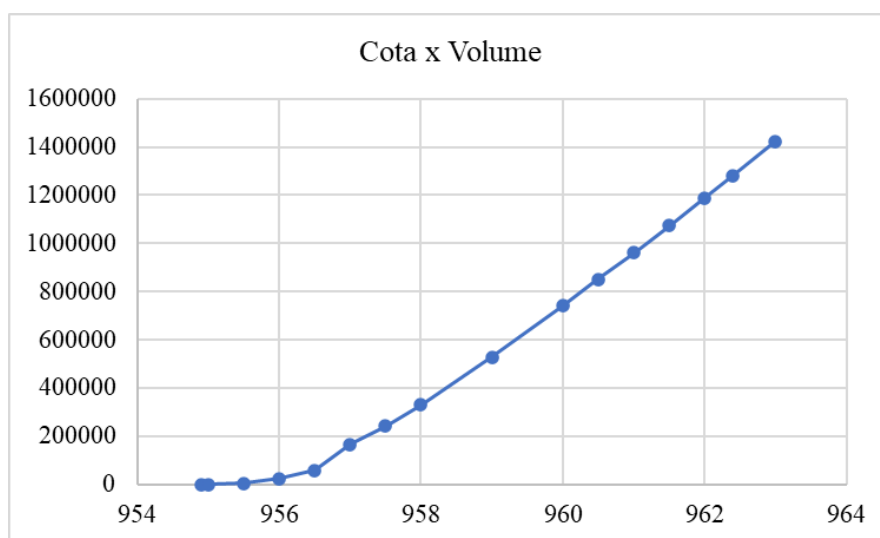
Conforme documentação técnica da estrutura, o vertedor da barragem foi dimensionado para uma chuva histórica com tempo de retorno decamilenar, com uma vazão máxima defluente de 3,05 m³/s e duração crítica do sistema em 12 horas.

Apesar de estar operando hidraulicamente de forma adequada e atendendo às recomendações da NBR 13.028, as inspeções de segurança regular (ISR) indicaram que a estrutura está em nível 3 de emergência devido às condições de estabilidade geotécnica. Essa instabilidade geotécnica da estrutura justifica a escolha do cenário hipotético de rompimento da barragem ocasionado por erosão interna e *piping* em dia sem precipitação.

4.3.1 EMBREA-MUD

Para gerar o hidrograma de ruptura da estrutura, considerou-se o volume de rejeitos do reservatório como 1.423.218 m³. A modelagem foi determinada com auxílio da curva Cota x Volume (Figura 32). Para desenvolver a brecha de ruptura foram considerados dois cenários de falhas causadas por fenômenos distintos. O primeiro cenário foi erosão interna e *piping*, já o segundo cenário, considera a falha estrutural por liquefação.

Figura 32 – Curva Cota x Volume (EMBREA-MUD).



Fonte: Autora.

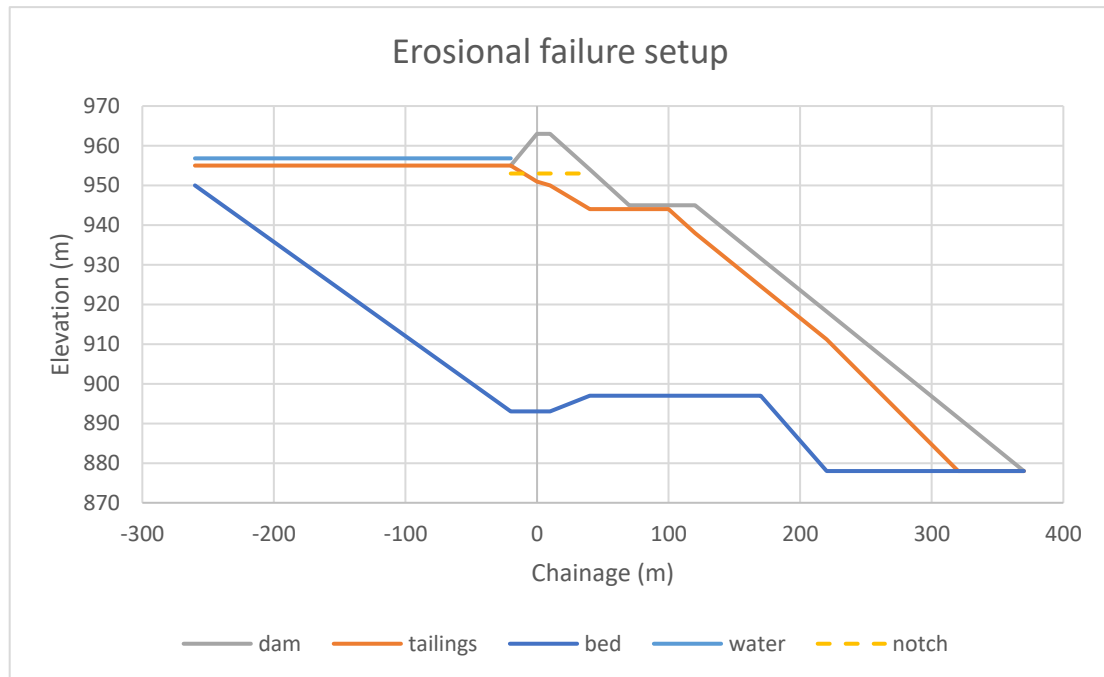
No software em questão, para o modo de falha por erosão interna e *piping*, foram consideradas três situações distintas representadas por E0, E1 e E2, apresentadas no Quadro 10.

Quadro 10 - Características reológicas dos fluidos simulados no cenário de erosão interna e *piping*.

Fluido	Tensão de escoamento – τ_y (Pa)	Viscosidade dinâmica - μ (Pa.s)	Tensão de cisalhamento crítica – τ_c (Pa)	Justificativa
E0	1000	50	1	Parâmetro de controle dos demais cenários
E1	200	10	1	Testar as propriedades do fluido simulado
E2	1000	50	10	Testar a erodibilidade da barragem (tipo enrocamento)

A Figura 33 apresenta a formação da falha na estrutura calculada através do software EMBREA MUD para o cenário de erosão interna e *piping*.

Figura 33 – Configuração da falha gerada no EMBREA MUD para o cenário de *piping*.



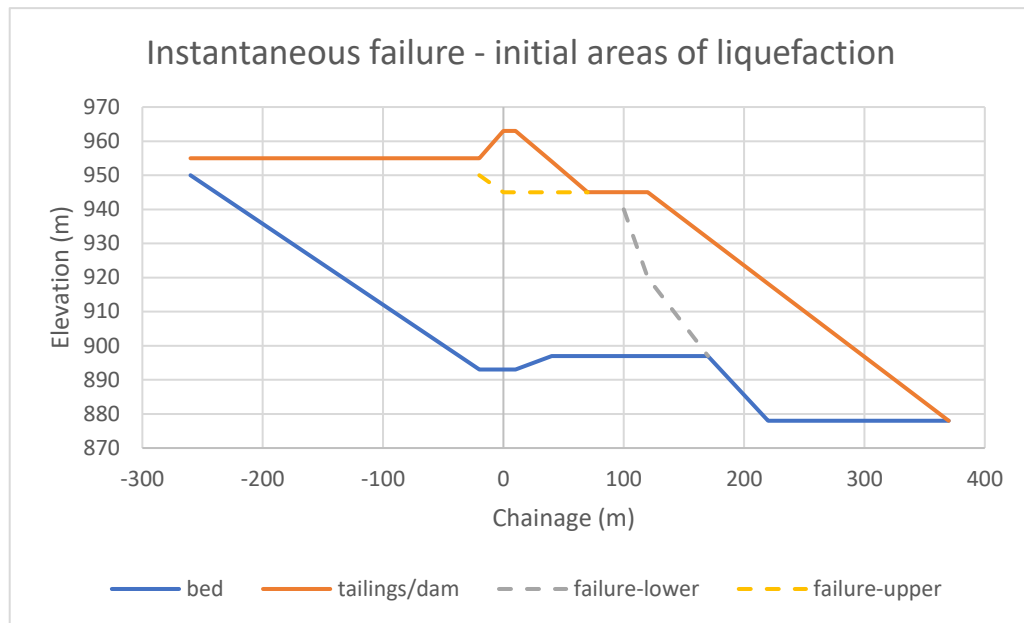
Fonte: Autora.

Para o modo de falha estrutural por liquefação, também foram consideradas três situações distintas representadas por I0, I1 e I2, apresentadas no Quadro 11. Os cenários simulados estão diretamente relacionados à região de rompimento da estrutura, ou seja, diferentemente do caso anterior que considera a brecha formada apenas na estrutura superior, para a simulação a seguir consideram-se cenários de falha da tanto da estrutura superior quanto da estrutura inferior (Figura 34).

Quadro 11 - Características reológicas dos fluidos simulados no cenário de falha estrutural por liquefação.

Fluido	Tensão de escoamento – τ_y (Pa)	Viscosidade dinâmica - μ (Pa.s)	Falha na inclinação	Justificativa
I0	1000	50	Inferior	Parâmetro de controle dos demais cenários
I1	200	10	Inferior	Testar as propriedades do fluido simulado
I2	1000	50	Superior	Testar o local de falha da estrutura

Figura 34 – Configuração da falha gerada no EMBREA MUD para o cenário de liquefação.

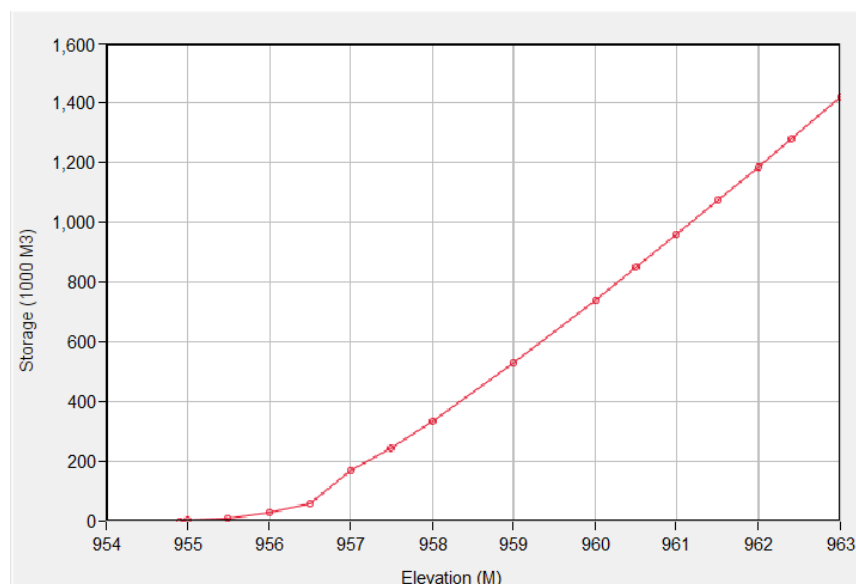


Fonte: Autora.

4.3.2 HEC-HMS

A avaliação do desenvolvimento da brecha em barragens de terra prevê uma geometria trapezoidal (ALMEIDA, 2021). Para modelar o desenvolvimento da brecha de ruptura, considerou-se a abertura de uma brecha inicial causada por erosão interna e *piping* da barragem a partir da elevação média da estrutura. O volume de rejeitos do reservatório considerado para a modelagem foi determinado com auxílio da curva Cota x Volume (Figura 35). Destaca-se que, considerou-se a mesma seção exutória, referente ao eixo do dique de contenção de sedimentos a jusante da estrutura.

Figura 35 – Curva Cota x Volume (HEC-HMS).



Fonte: Autora.

Os parâmetros da brecha de ruptura (Quadro 12), foram determinados conforme a metodologia simplificada de Froehlich (2016). A largura final foi determinada considerando a inclinação lateral da brecha de 0,25H:V. A Figura 36 ilustra a formação da brecha no barramento.

Quadro 12 – Parâmetros da brecha de ruptura.

Nível do reservatório no momento da ruptura	956,14
Volume do reservatório na elevação	1.423.218 m ³
Elevação da Crista	963
Elevação do Fundo	888
Largura Média	125 m
Altura da brecha	75 m
Largura do fundo	106 m
Tempo de formação	3h

Figura 36 – Brecha de ruptura.



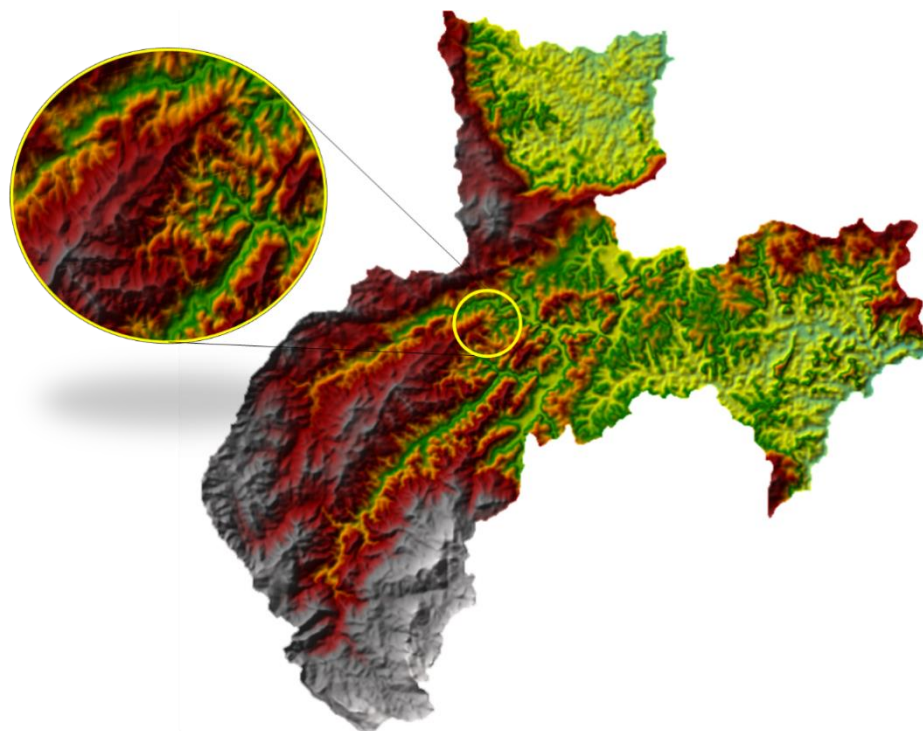
Fonte: Autora.

4.4 VARIÁVEIS DE ENTRADA E CONDIÇÃO DE CONTORNO

4.4.1 Modelo Digital do Terreno (MDT)

O Modelo Digital do Terreno (MDT) apresentado na Figura 37, foi obtido a partir de imagens do Modelo Digital de Elevação (MDE) do USGS (do inglês, *US Geological Survey*), pelo Radar Shuttle - SRTM (do inglês, *Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução de 30 m (*Arc-Second Global*).

Figura 37 – MDT – Modelo Digital do Terreno.



Fonte: Autora.

4.4.2 Malha

A escolha do tamanho da malha foi baseada na resolução das imagens de satélite e da distância do trecho em análise. A malha computacional traçada possui célula de 20 x 20 m, com refinamento no talvegue de 15 m.

Além disso, na Figura 38 são apresentadas as condições de contorno simuladas, conforme:

- Brecha – condição de contorno externa de montante, posicionada a montante do reservatório, com dados do hidrograma de ruptura obtidos através do HEC-HMS; e
- Saída – condição de contorno externa de jusante, baseada na declividade do local (0,00217 m/m – dado obtido a partir do MDE com base em geoprocessamento).

Figura 38 – Delimitação da malha.

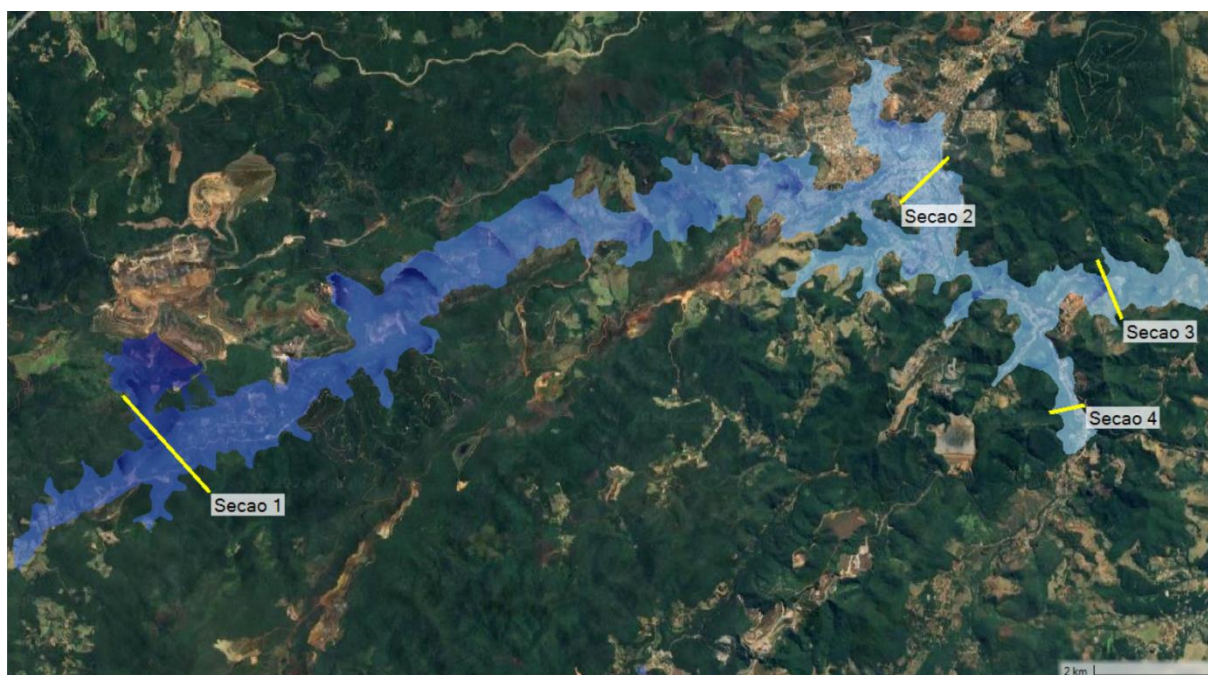


Fonte: Autora.

As seções de interesse, destacadas em amarelo na Figura 39, são as regiões onde os resultados obtidos pelas simulações são analisados. O Quadro 13 apresenta as seções delimitadas e a distância a partir da barragem simulada.

Ressalta-se que as seções delimitadas ao longo da jusante do reservatório foram estabelecidas de forma aleatória. Para delimitar a Seção 1 foi considerado como parâmetro a proximidade da estrutura. Para as demais seções, buscou-se utilizar como parâmetro áreas próximas as comunidades onde havia visualmente uma maior concentração do fluido.

Figura 39 – Localização das seções de interesse.



Fonte: Autora.

Quadro 13 – Distâncias entre as seções de interesse e a barragem.

Seção	Distância da estrutura em km
1	1,42
2	12,62
3	15,59
4	14,88

4.4.3 Parâmetros da simulação

O método de resolução das equações foi o Equações de Águas Rasas (SWE-ELM – original/ mais rápido), conforme recomenda o HEC-RAS, e os intervalos simulados foram:

- i. Intervalo computacional: 1 min;
- ii. Intervalo de saída do hidrograma: 1 min;
- iii. Mapeamento de intervalo de saída: 10 min; e
- iv. Intervalo de saída detalhado: 10 min.

Os intervalos computacionais simulados descritos acima foram obtidos a partir de uma iteração com o intuito de que os resultados promovessem as menores instabilidades possíveis. Variáveis adicionais que afetam a estabilidade são o número de iterações e o fator de ponderação theta. Para a simulação realizada o parâmetro theta utilizado foi de 1, tanto para o aquecimento quanto para a simulação e o número máximo de iterações foi de 20. A tolerância superficial de água foi de 0,003 m e a de volume de 0,003 m. Por fim, a declividade do curso hídrico em todas as condições de contorno com vazões foi de 0,00217 m/m, obtida através do processamento do MDE.

4.4.1 Coeficiente de *Manning*

Para o modelo hidráulico desenvolvido no HEC-RAS, foram simulados três cenários com variação do tipo de fluido e a rugosidade:

Simulação 1: O cenário considerado normal é a combinação do fluido newtoniano com a rugosidade média normal $n=0,03$;

Simulação 2: Em contrapartida, com o intuito de replicar o comportamento e velocidade de propagação do rejeito, será feita a combinação entre o fluido newtoniano e uma rugosidade alta, irreal, de $n=0,3$, estabelecida por Raman e Liu (2019), objetivando retardar a mancha de inundação para replicar o tempo de chegada da onda;

Simulação 3: O cenário de rejeito, é a associação entre o fluido não-newtoniano com a rugosidade média normal $n=0,03$ (Simulação 3).

A cobertura e ocupação do solo foi delimitada com base em imagem de satélite e os valores de coeficiente de *manning* adotados foram valores fixos em toda área inundada, sendo valores próximos aos propostos por Lumbroso *et al.* (2021), conforme o Quadro 14.

Quadro 14 - Coeficientes de rugosidade para canais naturais.

Tipo de uso do solo	Coeficiente de rugosidade de <i>Manning</i>			
	Normal	Fixo		
		Fluido Newtoniano	Fluido Newtoniano (cenário rejeito)	Fluido não-Newtoniano
Vegetação densa	0,167	0,03	0,3	0,03
Vegetação esparsa	0,063			
Solo exposto	0,031			
Área urbanizada	0,25			

Fonte: Adaptado de Lumbroso *et al.*, 2021.

4.5 REOLOGIA DOS FLUIDOS

As simulações realizadas para fluido newtoniano (água) consideraram os parâmetros automáticos do HEC-RAS. Para o estudo de caso da barragem selecionada conforme descrito no capítulo 5.1 ESTATÍSTICA DE FALHAS E RUPTURAS, o modelo reológico adotado foi o modelo de Bingham, uma vez que a estrutura armazena rejeitos de minério de ferro e, conforme exposto anteriormente, fluidos com altas concentrações de partículas finas se comportam conforme o modelo de Bingham.

Por conseguinte, os parâmetros reológicos empregados no modelo de Bingham foram definidos como a concentração volumétrica de sólidos (C_v), a tensão de escoamento (τ_y) e a viscosidade dinâmica (μ). Esses parâmetros foram escolhidos diante da observação dos dados disponíveis na literatura.

O estudo realizado por Melo (2022) reúne os parâmetros reológicos levantados para os rejeitos de carvão, cobre, ferro, lítio, metal base, níquel, ouro, pirofilita, urânio, zinco e materiais sintéticos e teóricos. O Quadro 15 é um compilado das pesquisas de Bagnold (1954), Fitton e Seddon (2011), Faitli e Gombkötő (2015), Ribeiro (2015), Zengeni (2016), Machado (2017), Wang *et al.* (2018), Gitari *et al.* (2018), Robertson *et al.* (2019), Jeong (2019),

Mahmood e Elektorowicz (2020), Contreras *et al.* (2020), Ligier (2020), Lumbroso *et al.* (2021) e Gibson *et al.* (2022) apresentado por Melo (2022) em seu estudo.

Quadro 15 - Intervalos de parâmetros reológicos de rejeitos

Parâmetro	Valores	Unidade	Referencia	Rejeitos	Ensaio/ Método	Modelo reológico / equação ajustada
Concentração volumétrica de sólidos (Cv)	21,21 – 35,78	%	Fitton e Seddon (2011)	Carvão	n.a.	n.a.
	27,98 – 46,65		Fitton e Seddon (2011)	Cobre		
	36,50 – 38,62		Fitton e Seddon (2011)	Ouro		
	36,34 – 44,62		Fitton e Seddon (2011)	Lítio		
	11,09 – 19,66		Fitton e Seddon (2011)	Níquel		
	25,48 – 31,25		Fitton e Seddon (2011)	Urânio		
	11,82 – 50,11		Fitton e Seddon (2011)	Zinco		
	18,0 – 52,5		Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base		
	21,8 – 55,3		Ribeiro (2015)	Ferro		
	32,5 – 65,0		Ribeiro (2015)	Ferro		
	9,3 – 48,4		Zengeni (2016)	Ouro		
	34,75 – 57,14		Machado (2017)	Ferro		
	58		Robertson <i>et al.</i> (2019)	Ferro		
	47		Ligier (2020)	Ferro		
	23		Gibson <i>et al.</i> (2022)	Ferro		
	61,5	%	Bagnold (1954)	-	-	n.a.

Quadro 15 - Intervalos de parâmetros reológicos de rejeitos

Parâmetro	Valores	Unidade	Referencia	Rejeitos	Ensaio/ Método	Modelo reológico / equação ajustada
Concentração volumétrica máxima teórica de sólidos ($C_{vm\acute{a}x}$)	53		Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	-	
	49 – 62,0*		Gitari <i>et al.</i> (2018)	Cobre	Wooster <i>et al.</i> (2008)**	
	59,9 – 76,5*		Mahmood e Elektorowicz (2020)	Ferro	Wooster <i>et al.</i> (2008)**	
	57,3 – 68,0*		Mahmood e Elektorowicz (2020)	Ouro	Wooster <i>et al.</i> (2008)**	
Viscosidade dinâmica (μ)	0,03 – 0,49	Pa.s	Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	Viscosímetro	Bingham
	0,15 – 2,69		Ribeiro (2015)	Ferro	Viscosímetro	Bingham
	0,002 – 0,311		Zengeni (2016)	Ouro	Viscosímetro	Bingham
	0,0071 – 0,4457		Machado (2017)	Ferro	Reômetro	Quadrática
	1,09 – 1,46		Jeong (2019)	Pirofilita	Reômetro	Bingham
	50		Ligier (2020)	Ferro	Calibração	Bingham
	30 - 100		Lumbroso <i>et al.</i> (2021)	Ferro	Calibração	Full Bingham
Tensão de escoamento (τ_y)	2,122 – 48,535	Pa	Fitton e Seddon (2011)	Carvão	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	0,641 – 93,50		Fitton e Seddon (2011)	Cobre	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	0,6 – 1,5		Fitton e Seddon (2011)	Ouro	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	1,048 – 11,165		Fitton e Seddon (2011)	Lítio	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	1,564 – 37,110		Fitton e Seddon (2011)	Níquel	Viscosímetro	Herschel-Bulkley

Quadro 15 - Intervalos de parâmetros reológicos de rejeitos

Parâmetro	Valores	Unidade	Referencia	Rejeitos	Ensaio/ Método	Modelo reológico / equação ajustada
	2,769 – 9,411		Fitton e Seddon (2011)	Uranio	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	0,652 – 100,260		Fitton e Seddon (2011)	Zinco	Viscosímetro	Herschel-Bulkley
	26,0 – 638,0		Faitli e Gombkötő (2015)	Metal base	Viscosímetro	Bingham
	19,36 – 602,82		Ribeiro (2015)	Ferro	Viscosímetro	Bingham
	59,59 – 2.396,53**		Ribeiro (2015)	Ferro	Teste de slump	Bingham
	0,5 – 181,0		Zengeni (2016)	Ouro	Viscosímetro	Bingham
	0,085 – 118,0		Machado (2017)	Ferro	Reômetro	Quadrática
	12,0 – 23,0		Jeong (2019)	Pirofilita	Reômetro	Herschel-Bulkley
	9,7 – 251,9		Contreras <i>et al.</i> (2020)	Sintético	Reômetro	Herschel-Bulkley
	100,0 – 1.000,0		Ligier (2020)	Ferro	Calibração	Bingham
	750,0 – 1.000,0		Lumbroso <i>et al.</i> (2021)	Ferro	Calibração	Full Bingham

* Valores obtidos com base na porosidade do rejeito

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

***Cv de 65% no Teste de slump

n.a.: não aplicável

Fonte: Adaptado de Melo, 2022.

A concentração volumétrica foi definida com base na referência de Ligier (2020) para rejeito de minério de ferro. Além disso, o valor selecionado também faz parte do intervalo de valores propostos para rejeito de minério de ferro por Ribeiro (2015) e Machado (2017).

A viscosidade dinâmica também teve como referência o valor proposto para rejeito de ferro por Ligier (2020), que tinha modelo reológico e equação ajustada pelo método de Bingham. Ainda, o valor da viscosidade dinâmica também está contido no intervalo de grandezas proposto por Lumbroso *et al.* (2021). Por fim, a tensão de escoamento selecionada faz parte do intervalo de valores sugeridos por Ribeiro (2015) e Ligier (2020) considerando o modelo reológico e equação ajustada pelo método de Bingham.

Desta forma, para o fluido não-newtoniano utilizou-se a metodologia de Bingham cuja as características reológicas do material são apresentadas na Figura 40 e descritas no Quadro 16.

Figura 40 – Métodos e parâmetros fluido não-newtoniano.

The image shows a software interface for defining non-Newtonian fluid parameters. The 'Non-Newtonian Method' is set to 'Bingham'. The 'Concentration and Bulking' section shows a 'Volumetric Concentration (Cv) (%)' of 47. The 'Shear Components' section shows a 'Yield Strength' of 200 Pa and a 'Mixture Dynamic Viscosity' of 50 Pa.s. Other parameters like 'Representative Grain Size', 'Max Cv (%)', 'Generalized Herschel-Bulkley Parameters', and 'Clastic Methods' are also visible.

Fonte: Autora.

Quadro 16 - Características reológicas do fluido simulado

Propriedade	Símbolo	Valor
Concentração volumétrica (%)	C_v	47
Tensão de escoamento (Pa)	τ_y	200
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	μ	50

4.6 ANÁLISE DE DADOS E ESTATÍSTICA

A análise de dados foi promovida em duas etapas, sendo que a primeira envolveu a comparação da área inundada gerada nos cenários determinísticos criados, a partir da variação do tipo de fluido, com adoção do coeficiente de rugosidade médio e alto. A segunda constituiu-se da análise estatística da mancha de inundação ao longo do trecho estudado, comparando as respostas do modelo às variações do tipo de fluido e do coeficiente de *manning*, pelas duas distribuições adotadas: médio normal e alto (não real).

A propagação da mancha de inundação foi obtida no HEC-RAS versão 6.3.1 através do RAS Mapper (USACE, 2021). Foram gerados os mapas de envoltória máxima das áreas inundadas, sendo que o RAS Mapper fornece a área das envoltórias. Para a análise estatística, foram delimitadas quatro seções transversais para o estudo do efeito das variações de *manning*, em relação ao tipo de fluido sobre as variáveis de velocidade, profundidade máxima e vazão de pico.

A seção 1 compreende a região à jusante próxima ao barramento, enquanto a seção 2, abrange um trecho entre meandros. Já as seções 3 e 4, delimitam trechos onde há visivelmente uma maior variação da área inundada (Figura 40).

A análise estatística foi conduzida por meio da execução de comandos estatísticos incorporados ao software RStudio, versão 4.3.2. Os dados de velocidade e profundidade em seções transversais foram avaliados para os três cenários definidos (simulações). A não normalidade foi confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk (1995), teste escolhido pois se trata de amostras com mais 100 valores por seção transversal. Na sequência, para lidar com dados não normalmente distribuídos, utilizou-se o teste preconizado por Wilcoxon (1992), considerado uma estratégia adequada para lidar com dados não normalmente distribuídos e dependentes. Diferenças significativas foram consideradas quando o p-valor fosse menor do que 5%. Para análise estatística, também foram construídos gráficos do tipo *Boxplot* para as variáveis de velocidade e profundidade.

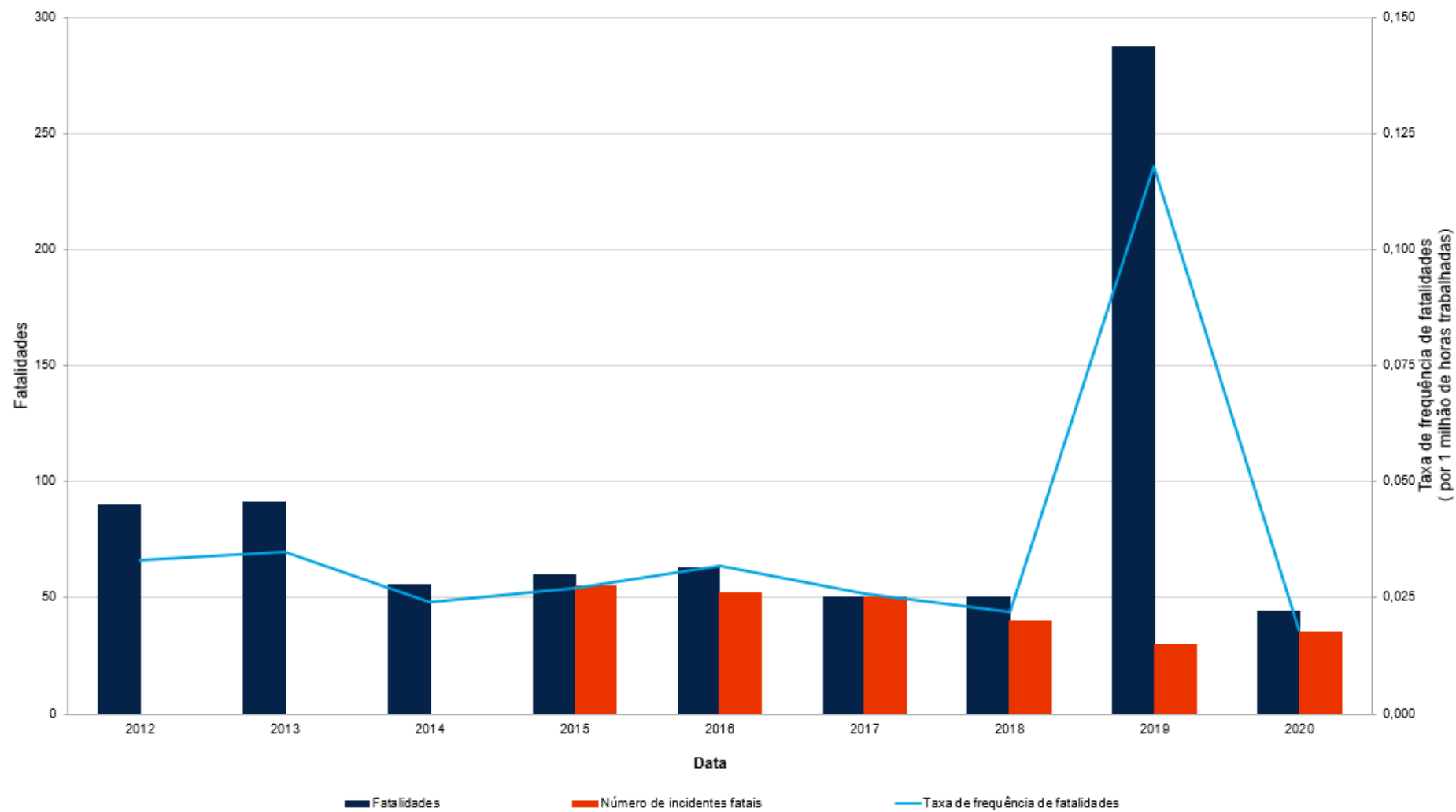
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTATÍSTICA DE FALHAS E RUPTURAS

O Conselho Internacional de Metais (ICMM, 2020) reportou o número de incidentes fatais e fatalidades envolvendo empresas ligadas ao mesmo. A Figura 41 mostra o número de fatalidades, incidentes fatais e a taxa de frequência das fatalidades, ocorridas entre os anos de 2012 e 2020. Em 2019 é possível observar uma elevação significativa das fatalidades em

comparação aos anos anteriores. Concluiu-se que essa elevação no número de fatalidades se relaciona diretamente com a ruptura ocorrida no Município de Brumadinho (ICMM, 2020)

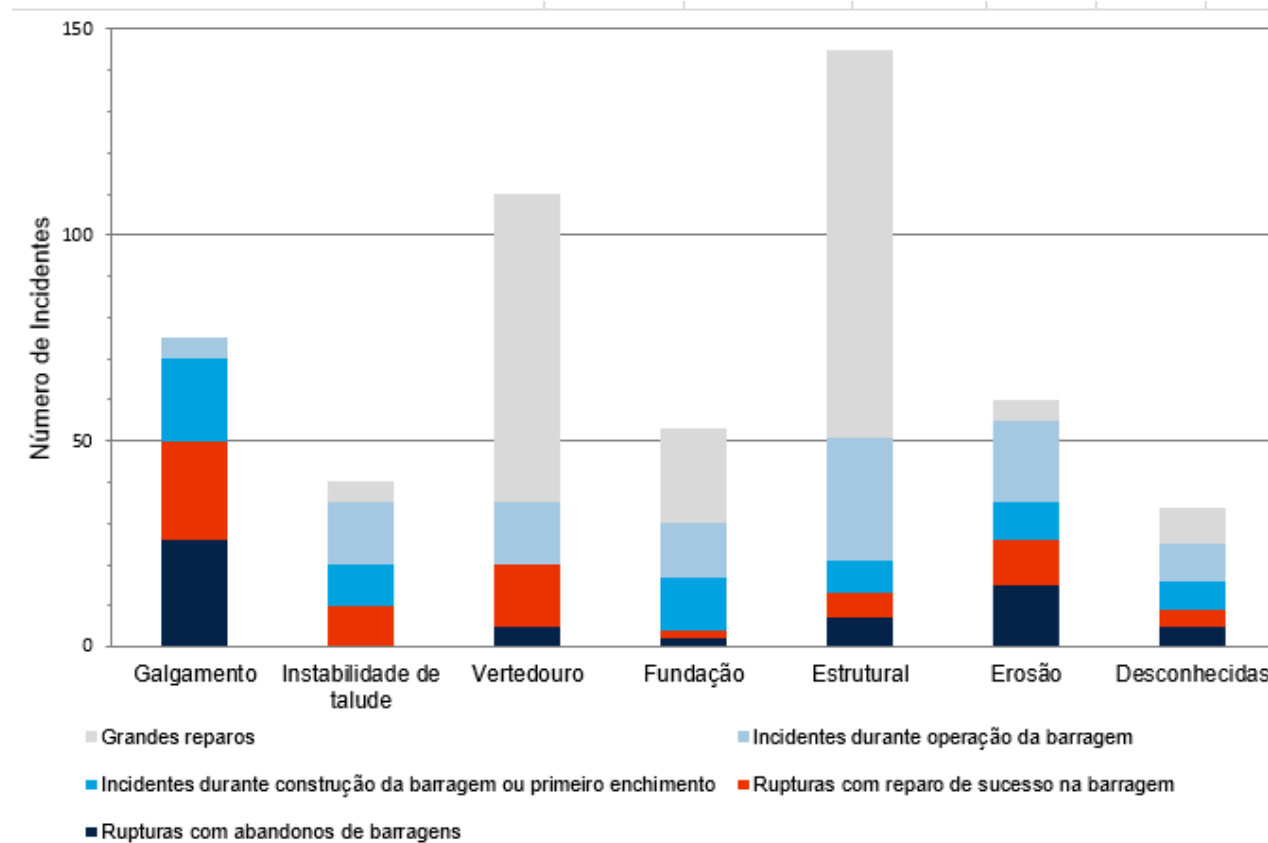
Figura 41 -Total de fatalidades do ICMM e taxa de frequência de acidentes fatais 2012 – 2020.



Fonte: ICMM, 2020.

No ano de 2001, o ICOLD - *International Commission on Large Dams*, publicou um estudo considerando 517 casos de rupturas ou incidentes ocorridos em barragens de todo o mundo, cujas distribuições, por modo de falha, estão apresentadas através da Figura 42 e do Quadro 17.

Figura 42 - Rupturas e Incidentes em barragens de água e rejeito por modo de falha.



Fonte: Adaptado de ICOLD, 2001.

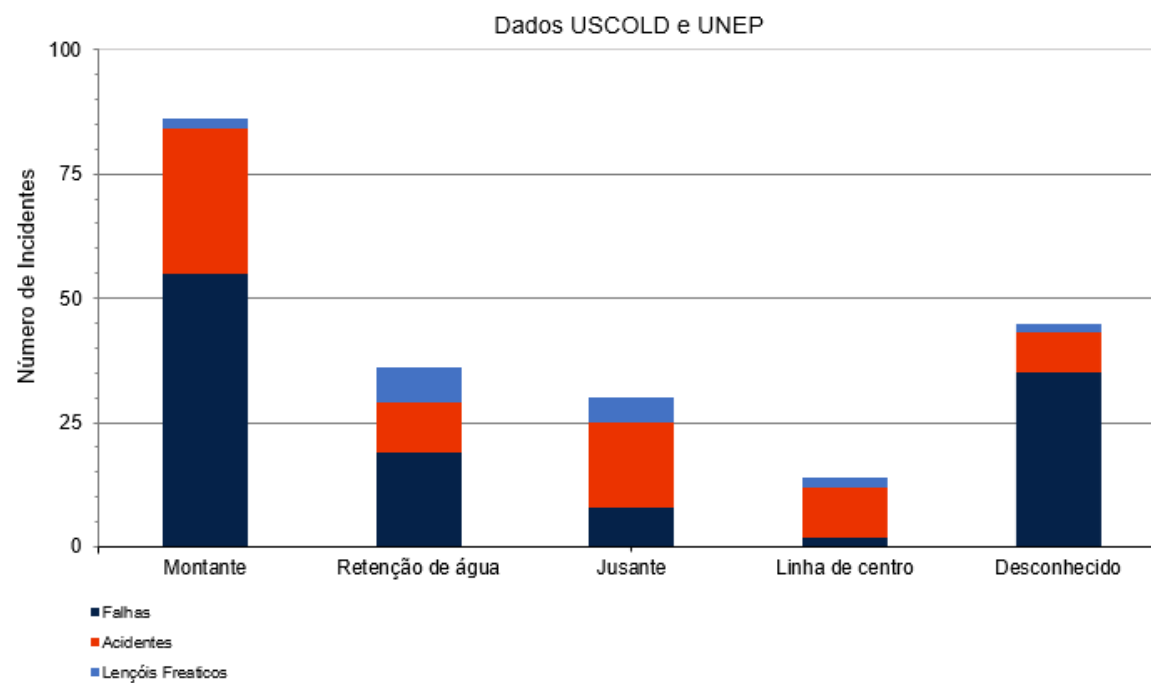
Quadro 17 - Ocorrência dos modos de falha.

Modo de Falha	Incidência	Porcentagem
Galgamento	75	15%
Instabilidade de Talude	40	8%
Vertedouro	110	21%
Fundação	53	10%
Estrutural	145	28%
Erosão	60	12%
Desconhecidas	34	7%
Total	517	100%

Fonte: Adaptado de ICOLD, 2001.

O mesmo ICOLD (2001), contabilizou o número de falhas em barragens de rejeitos por método construtivo, conforme Figura 43 e Quadro 18.

Figura 43 - Tipos de barragens de rejeitos e incidentes.



Fonte: Adaptado de ICOLD, 2001.

Quadro 18 - Tipos de barragens de rejeitos e incidentes. Mesmo comentário dos Quadros acima. Padronizar.

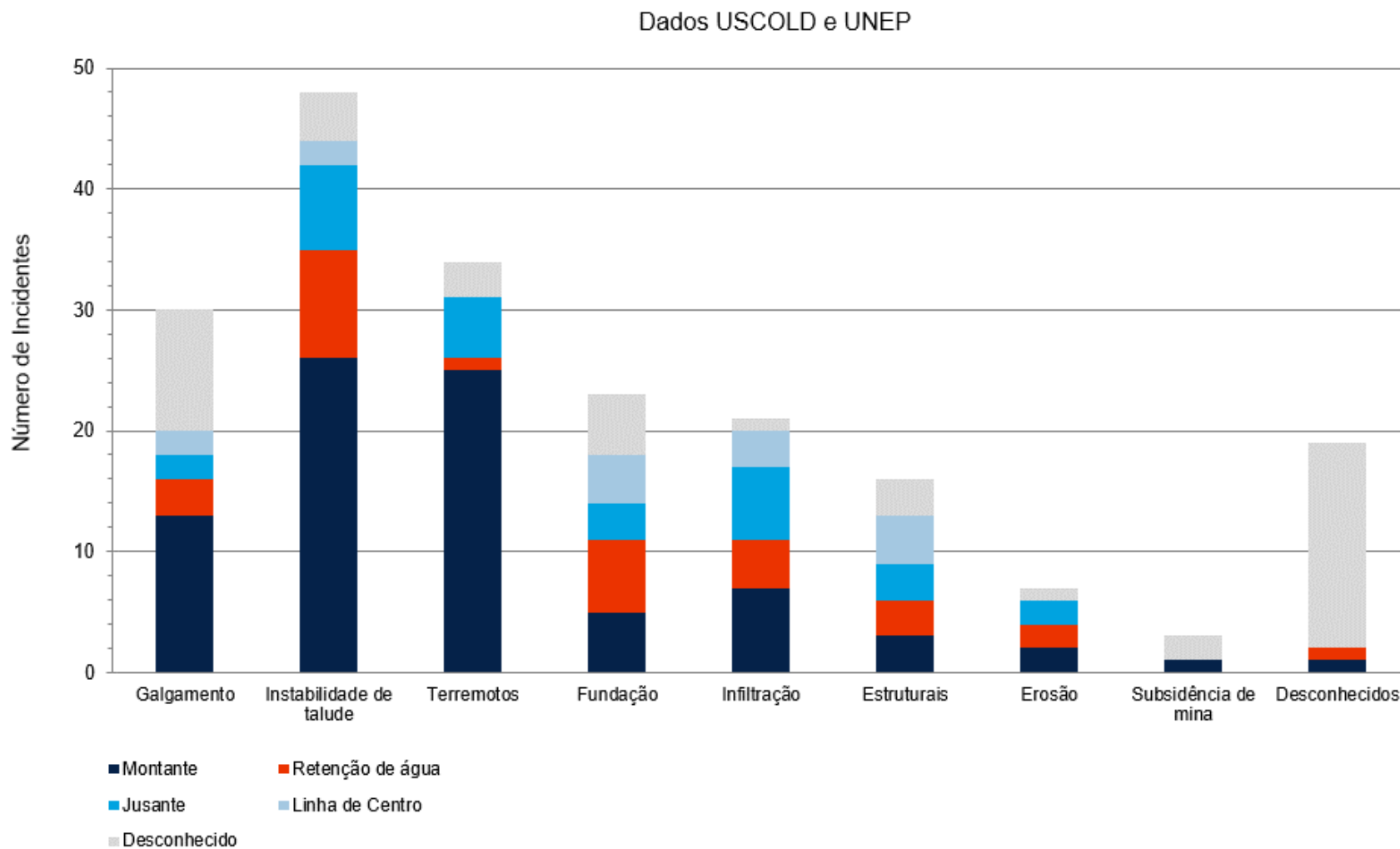
Incidentes	Montante	Retenção de água	Jusante	Linha de Centro	Desconhecido
Falhas	55	19	8	2	35
Acidentes	29	10	17	10	8
Lençóis Freáticos	2	7	5	2	2
Total	86	36	30	14	45
Porcentagem	41%	17%	14%	7%	21%

Fonte: Adaptado de ICOLD, 2001.

Já o relatório do ICOLD (2001) indicou o número de incidentes por modo de falha e por tipo de barragem, conforme apresentado na Figura 44.

O Quadro 19 mostra os dados de modo de falha por tipo de estrutura. É possível observar que entre os fatores que interferiram na estabilidade da estrutura, destacam-se os que estão relacionados a condições climáticas, eventos pluviométricos extremos, dimensionamento inadequado de vertedouros e terremotos, além de condições específicas, tais como questões associadas às fundações das estruturas.

Figura 44 - Modos de falha em barragens de rejeitos.



Fonte: Adaptado de ICOLD, 2001

Quadro 19 - Modos de falha em barragens de rejeitos.

Incidentes	Montante	Retenção de água	Jusante	Linha de Centro	Desconhecido	Total	%
Galgamento	13	3	2	2	10	30	15%
Instabilidade de taludes	26	9	7	2	4	48	24%
Terremotos	25	1	5	0	3	34	17%
Fundação	5	6	3	4	5	23	11%
Infiltração	7	4	6	3	1	21	11%
Estruturais	3	3	3	4	3	16	8%
Erosão	2	2	2	0	1	7	3%
Subsidência de mina	1	0	0	0	2	3	1%
Desconhecidos	1	1	0	0	17	19	9%
Total	83	29	28	15	46	201	
%	41%	14%	14%	7%	23%		

Nota: Nove casos não foram avaliados.

Fonte: Adaptado de ICOLD, 2001.

Nesta mesma linha de raciocínio, segundo o CSP2 – *Center for Science in Public Participation*, citado por Fernandes (2020, p. 333), foram registrados 281 rupturas e incidentes envolvendo barragens de rejeitos entre 1900 e agosto de 2016, conforme registrado no Quadro 20.

Os modos de falha foram separados por barragens de rejeitos ativas, barragens de rejeitos inativas, barragens de sedimentos ativas e barragens de sedimentos inativas. Sendo:

- Barragens de rejeitos ativas: são barragens de rejeitos em operação;
- Barragens de rejeitos inativas: são barragens de rejeitos fora de operação;
- Barragens de sedimentos ativas: são barragens de sedimentos em operação;
- Barragens de sedimentos inativas: são barragens de sedimentos fora de operação.

Para a gravidade da ruptura, considerou-se:

- **Rupturas muito graves:** Perda múltipla de vidas (~20) e/ou descarga total $\geq 1.000.000 \text{ m}^3$ e/ou deslocamento de material até 20 km ou mais;
- **Rupturas graves:** Perda múltipla de vidas e/ou descarga total $\geq 100.000 \text{ m}^3$ e/ou deslocamento de material até 20 km ou mais;
- **Outras rupturas:** Falhas de engenharia/instalações que não sejam classificadas como muito graves ou graves, sem perda de vidas; e
- **Outros incidentes:** Rupturas não classificadas nos critérios anteriores.

Quadro 20 - Modos de falha em barragens de rejeitos de 1900 até agosto de 2016.

Modos de Falha		Rupturas muito graves	Rupturas graves	Outras rupturas	Outros incidentes	Total		%
Desconhecidos ou sem informação	Barragens de rejeitos ativas	14	15	16	-	45	55	20,22
	Barragens de rejeitos inativas	1	1	4	-	6		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos inativas	-	-	4	-	4		
Galgamento	Barragens de rejeitos ativas	3	4	22	-	29	48	17,65

Quadro 20 - Modos de falha em barragens de rejeitos de 1900 até agosto de 2016.

Modos de Falha		Rupturas muito graves	Rupturas graves	Outras rupturas	Outros incidentes	Total		%
	Barragens de rejeitos inativas	2	1	12	-	15		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	1	-	1		
	Barragens de sedimentos inativas	-	-	3	-	3		
Instabilidade de talude (falha estática)	Barragens de rejeitos ativas	6	4	18	-	28	45	16,54
	Barragens de rejeitos inativas	-	2	-	-	2		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos inativas	-	-	15	-	15		
Terremoto (instabilidade sísmica)	Barragens de rejeitos ativas	2	4	16	-	22	42	15,44
	Barragens de rejeitos inativas	-	1	4	-	5		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	10	-	10		
	Barragens de sedimentos inativas	-	-	5	-	5		
Erosão Interna e <i>piping</i> (maciço e fundação)	Barragens de rejeitos ativas	2	3	11	-	16	25	9,19
	Barragens de rejeitos inativas	-	-	1	-	1		
	Barragens de	-	-	-	-	-		

Quadro 20 - Modos de falha em barragens de rejeitos de 1900 até agosto de 2016.

Modos de Falha		Rupturas muito graves	Rupturas graves	Outras rupturas	Outros incidentes	Total		%
	sedimentos ativas							
	Barragens de sedimentos inativas	-	1	7	-	8		
Falha estrutural de fundação	Barragens de rejeitos ativas	4	1	8	-	13	23	8,45
	Barragens de rejeitos inativas	-	1	1	-	2		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos inativas	-	-	8	-	8		
Estrutural	Barragens de rejeitos ativas	3	5	6	-	14	19	6,98
	Barragens de rejeitos inativas	2	-	-	-	2		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos inativas	-	1	1	1	3		
Erosão externa	Barragens de rejeitos ativas	2	2	3	-	7	11	4,04
	Barragens de rejeitos inativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	1	-	1		
	Barragens de sedimentos inativas	-	-	3	-	3		

Quadro 20 - Modos de falha em barragens de rejeitos de 1900 até agosto de 2016.

Modos de Falha		Rupturas muito graves	Rupturas graves	Outras rupturas	Outros incidentes	Total		%
Subsidência	Barragens de rejeitos ativas	1	-	-	-	1	1	0,37
	Barragens de rejeitos inativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos inativas	-	-	-	-	-		
Falha generalizada	Barragens de rejeitos ativas	1	-	-	-	1	1	0,37
	Barragens de rejeitos inativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos ativas	-	-	-	-	-		
	Barragens de sedimentos inativas	-	-	-	-	-		
Sem Informação		-	-	2	-	2	2	0,74
Total		43	46	182	1	272		100

Fonte: Adaptado de CSP2 Apud Fernandes, 2020.

Os dados apresentados no Quadro 20, indicam os modos de falha com maior ocorrência no período analisado. Destaca-se o galgamento (17,65%) com maior incidência, seguido de instabilidade de taludes por falha estática (16,54%) e instabilidade sísmica por terremoto (15,44%). Vale ressaltar que 20,22% das rupturas analisadas tiveram o modo de falha como desconhecido.

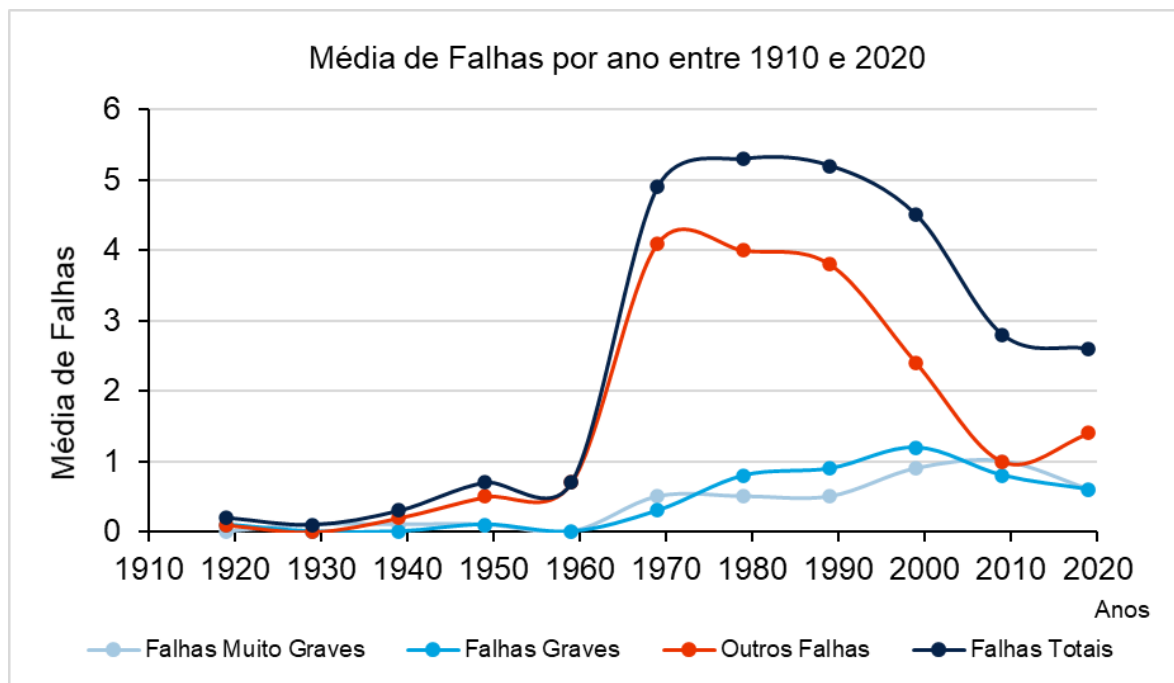
5.1.1 Frequência de Falhas e Rupturas

Para obtenção do índice das frequências de rupturas, é necessário o cálculo ou a estimativa da ocorrência desses eventos de rupturas. Para o caso de ruptura de barragens de rejeitos, o cálculo dessa frequência é bastante complexo devido à ausência de um banco de

dados completo que apresente um histórico de falhas e colapsos de barragens no Brasil e no mundo.

O CSP2 coleta e divulga desde 2011 análises históricas de falhas, rupturas e incidentes envolvendo barragens de rejeitos ocorridos a partir de 1900. A Figura 45 e o Quadro 21, mostram os registros de falhas em barragens de rejeitos por severidade.

Figura 45 - Falhas e rupturas em barragens de rejeitos entre 1910 e 2020.



Fonte: CSP2,2021.

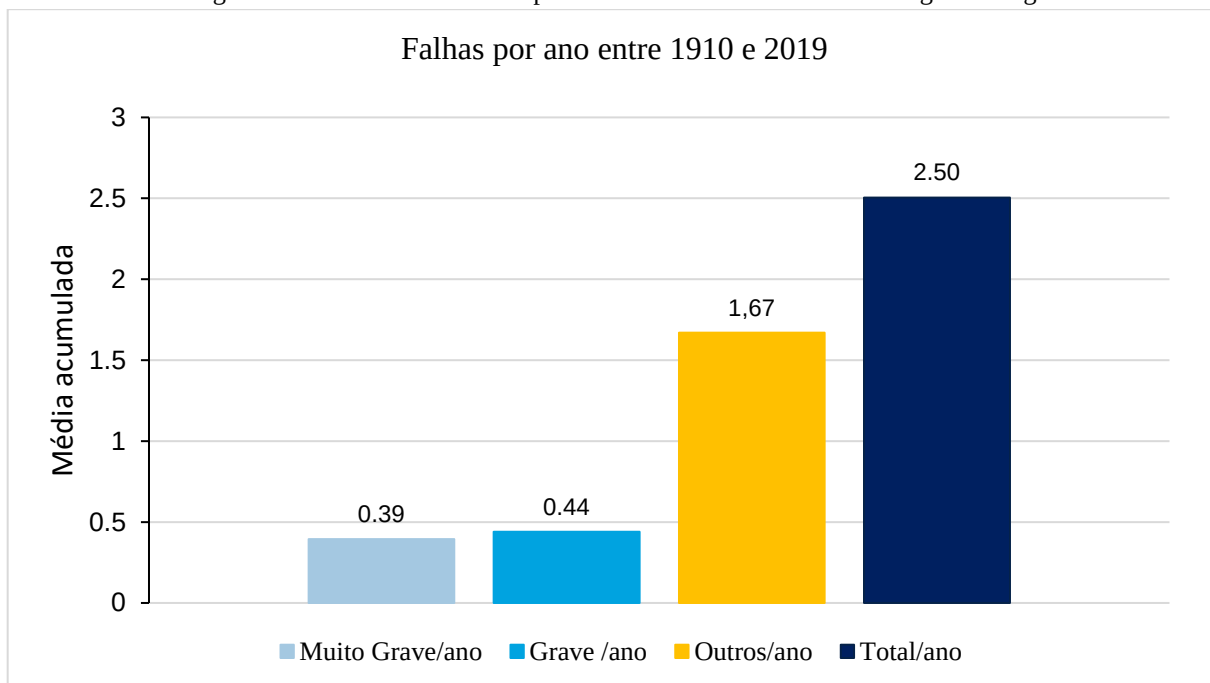
Quadro 21 - Falhas em barragens de rejeitos por severidade ao longo dos anos.

Período	Muito Grave	Grave	Outros	Total
1910 - 1919	0	1	1	2
1920 - 1929	1	0	0	1
1930 - 1939	1	0	2	3
1940 - 1949	1	1	5	7
1950 - 1959	0	0	7	7
1960 - 1969	5	3	41	49
1970 - 1979	5	8	40	53
1980 - 1989	5	9	38	52
1990 - 1999	9	12	24	45
2000 - 2009	10	8	10	28
2010 - 2019	6	6	14	26
TOTAL	43	48	182	273

Fonte: CSP2, 2021.

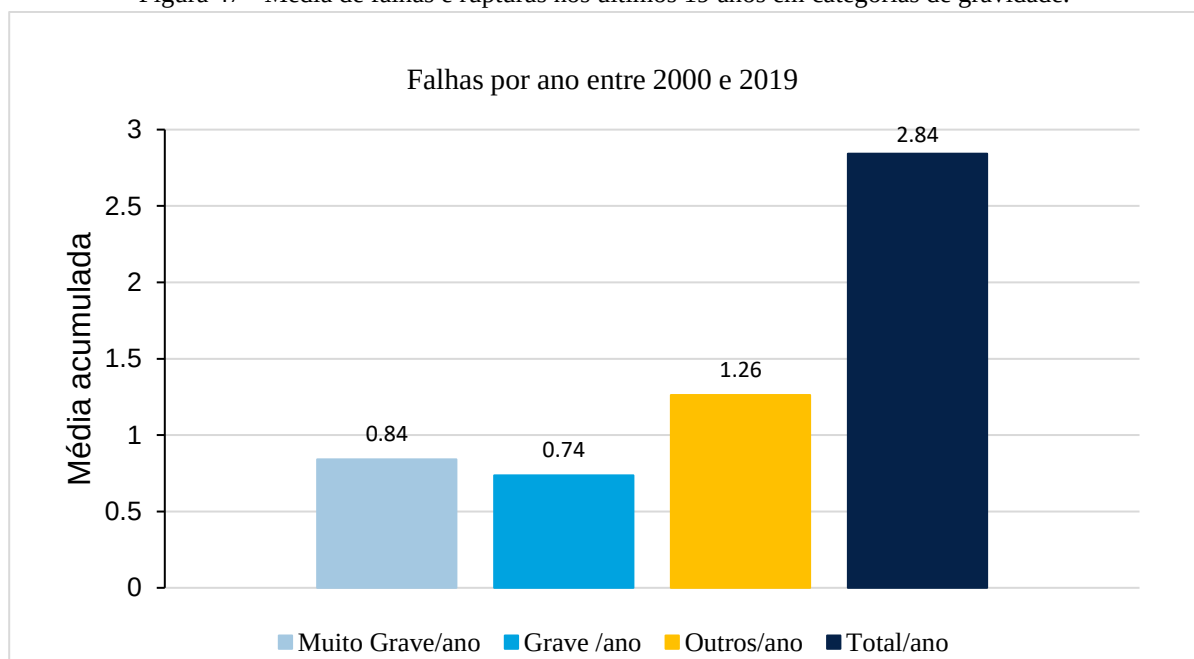
Se fossem considerados os 109 anos de dados registrados pelo CSP2, a média de falhas por ano seria em torno de 2,5. No entanto, considerando a ausência de dados ao longo dos anos e objetivando valores com maior representatividade, apenas os dados relativos aos últimos 19 anos, foram computados. Dessa forma, a média de falha resultante foi de 2,84 falhas por ano, conforme ilustrado pelas Figura 46 e Figura 47.

Figura 46 - Média de falhas e rupturas nos últimos 109 anos em categorias de gravidade.



Fonte: CSP2, 2021.

Figura 47 - Média de falhas e rupturas nos últimos 19 anos em categorias de gravidade.



Fonte: CSP2, 2021.

Em 2021, o CSP2 estimou o número de barragens de rejeitos no mundo. Os dados coletados de fontes oficiais de barragens apresentados por diversos países, resultou em 19.214 barragens, o que, com base em dados da produção mineral mundial, correspondia a cerca de 60% do total de barragens de rejeitos no mundo. Sendo assim, o CSP2 (2021) concluiu que o número total de barragens de rejeitos no mundo seria 32.023.

Com base nos valores apresentados acima, foi estimada a frequência de falhas de barragens de rejeitos conforme a eq. (6) mostrada abaixo.

$$f = \frac{\text{Média de falhas por ano}}{\text{Nº de barragens em operação}} \left[\frac{\text{acidentes}}{\text{ano.barragem}} \right] \quad (6)$$

∴

$$f = \frac{2,84}{32023} = 8,87 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{acidentes}}{\text{ano.barragem}} \right]$$

Considerando a distribuição apresentada no Quadro 19, o Quadro 22 apresenta a frequência de falha para cada tipo de barragem, enquanto o Quadro 23 apresenta a distribuição percentual para cada modo de falha.

Quadro 22 - Probabilidade de falha por tipo de barragem.

Tipo de barragem	Frequência de falha (/ano-barragem)
Barragens de rejeitos ativas	5,74E ⁻⁰⁵
Barragens de rejeitos inativas	1,11E ⁻⁰⁵
Barragens de sedimentos ativas	3,59E ⁻⁰⁶
Barragens de sedimentos inativas	1,60E ⁻⁰⁵
Desconhecidos ou sem informação	6,54E ⁻⁰⁷
Total	8,87E⁻⁰⁵

Fonte: CSP2, 2021.

Quadro 23 - Percentual de modos de falha por tipo de barragem.

Modos de Falha	Tipo de barragem				
	Barragens de rejeitos ativas	Barragens de Rejeitos inativas	Barragens de sedimentos ativas	Barragens de sedimentos inativas	Desconhecido ou sem informação
Desconhecidos ou sem informação	25,6%	17,6%	0,0%	8,2%	100,0%
Galgamento	16,5%	44,1%	9,1%	6,1%	0,0%
Instabilidade de taludes	15,9%	5,9%	0,0%	30,6%	0,0%
Terremoto	12,5%	14,7%	90,9%	10,2%	0,0%
Erosão interna e <i>piping</i>	9,1%	2,9%	0,0%	16,3%	0,0%
Falha estrutural da fundação	7,4%	5,9%	0,0%	16,3%	0,0%
Estrutural	8,0%	5,9%	0,0%	6,1%	0,0%
Erosão externa	4,0%	2,9%	0,0%	6,1%	0,0%
Subsidência	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Falha Generalizada	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: Adaptado de CSP2, 2021.

Conforme analisado, a frequência de ruptura é maior em barragens de rejeitos inativas motivada por galgamento. Ainda que o cenário de terremoto apresente um percentual alto, o objetivo é aproximar da realidade do Brasil, considerando que as causas de rupturas registradas nos últimos anos não foram por abalos sísmicos.

Em conformidade com o capítulo 2.5 BARRAGENS EM MINAS GERAIS, o Quadro 2 apresenta as rupturas ocorridas no Brasil. Todas as rupturas registradas ocorreram no estado de Minas Gerais, o que motivou a escolha da estrutura. Dessa forma, a estrutura a ser analisada é uma barragem de rejeitos inativa, localizada em Minas Gerais na região do quadrilátero ferífero. A jusante da estrutura, está localizada uma barragem de sedimentos que, caso ocorra a ruptura da barragem superior, ocorrerá o galgamento, ou seja, efeito cascata. Por essa razão, embora o modo de falha do barramento é estrutural motivado pelo fenômeno da liquefação,

ainda assim, haverá o galgamento da estrutura ao pé da barragem em decorrência do seu colapso.

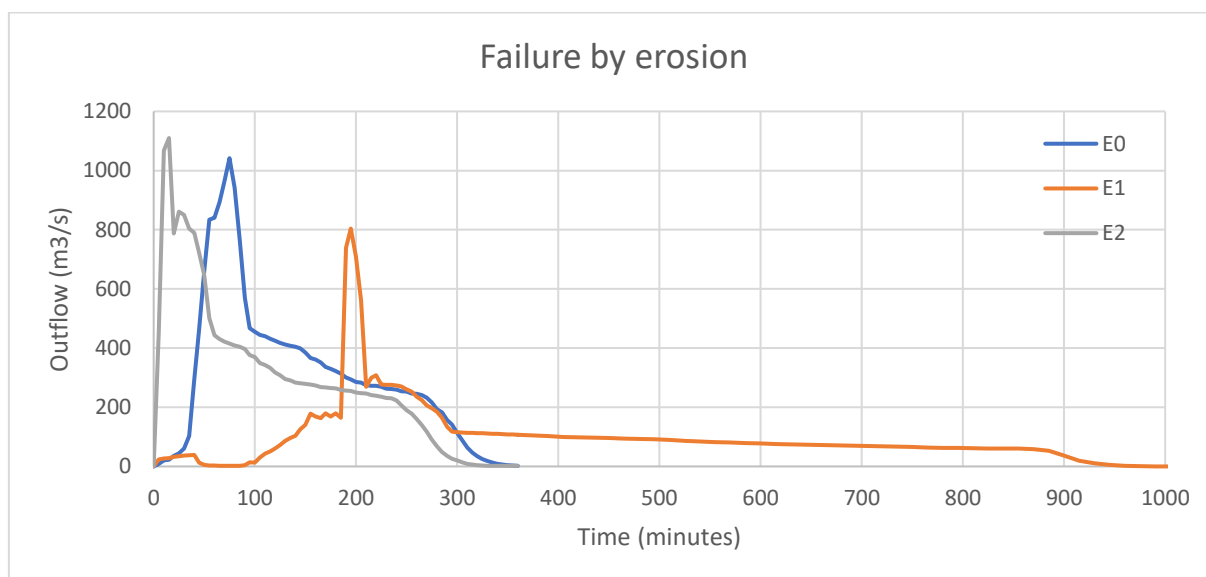
5.2 HIDROGRAMA DE RUPTURA

5.2.2 EMBREA MUD

O hidrograma de ruptura gerado pelo software EMBREA MUD para a brecha calculada para cenário de erosão interna e *piping* está apresentado na Figura 48.

No software em questão foram considerados três fluidos com parâmetros reológicos distintos representados por E0, E1 e E2, conforme exposto anteriormente no Quadro 10 (capítulo 4.3). O cenário representado no gráfico por E1, é o mais lento devido a menor tensão de cisalhamento. O pico do hidrograma de ruptura ocorreu em 03:15 horas com vazão de 804 m³/s. O E2 é o cenário mais rápido devido a maior erodibilidade, dessa forma o pico transcorreu em 00:15 minutos e teve vazão de 1.068 m³/s. A hipótese E0, realizado como parâmetro de controle dos demais, representa o hidrograma de ruptura a uma tensão de cisalhamento e erodibilidade normais, com pico em 01:15 horas e vazão de 1.042 m³/s.

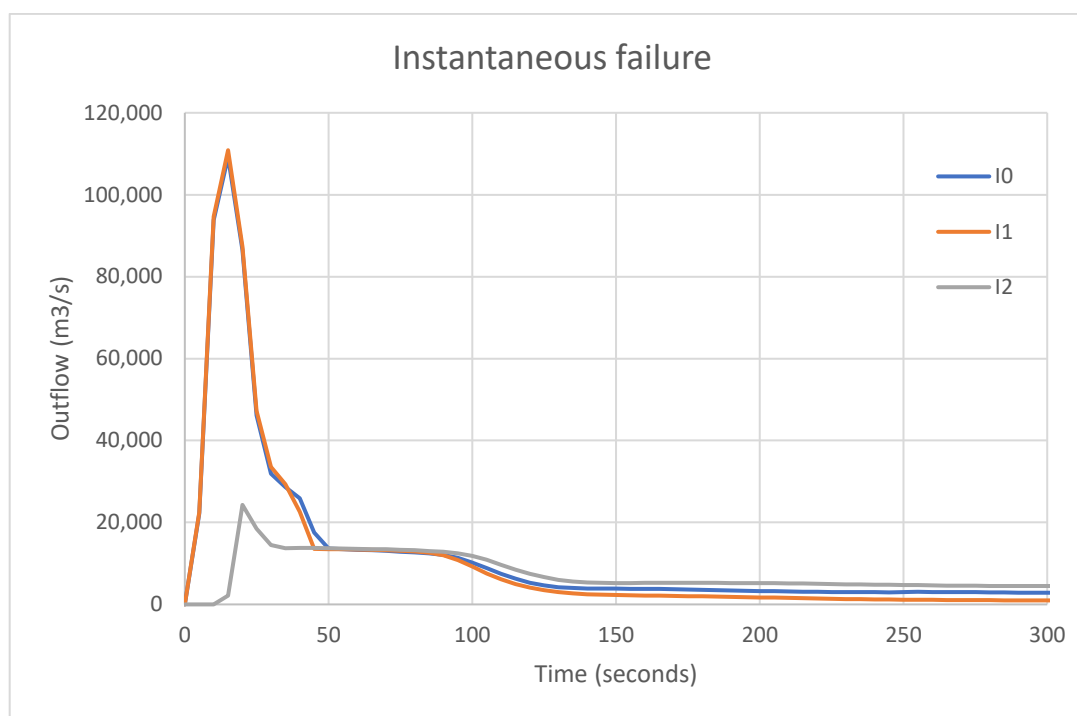
Figura 48 - Hidrograma de ruptura gerado no EMBREA MUD para o cenário de *piping*.



Fonte: Autora.

Para o modo de falha estrutural por liquefação, conforme exposto anteriormente e apresentado no Quadro 10 (capítulo 4.3), foram considerados três fluidos com parâmetros reológicos distintos intitulados I0, I1 e I2. O hidrograma de ruptura para a brecha calculada para o cenário de falha hipotética estrutural por liquefação está apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Hidrograma de ruptura gerado no EMBREA MUD para o cenário de liquefação.



Fonte: Autora.

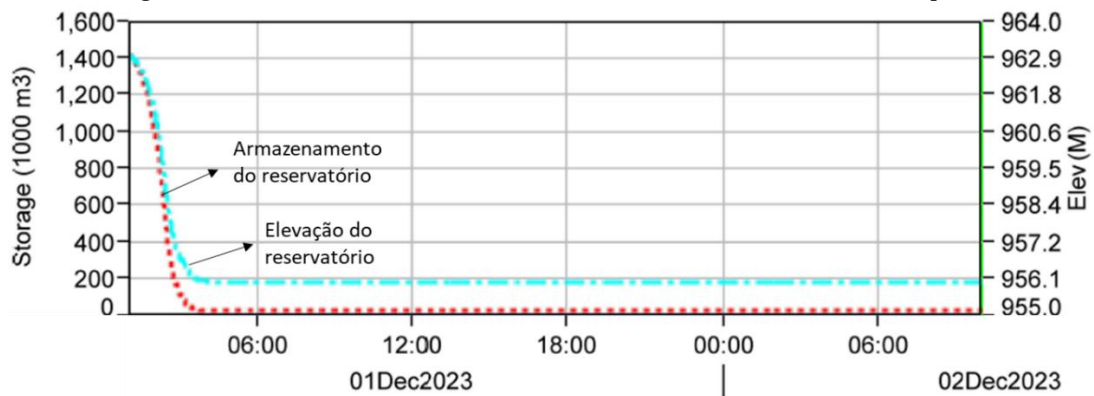
A hipótese apresentada no gráfico por I1 considera a ruptura a partir da estrutura inferior. Inicialmente, o processo foi submetido a forças de gravidade mínimas e, posteriormente, a erosão foi mais lenta devido a menor tensão de cisalhamento. Ainda, em I1, o pico do hidrograma de ruptura ocorreu em 15 segundos com vazão de 110.866 m³/s. O cenário I0, estabelecido como parâmetro de controle, também considerou a ruptura a partir da estrutura inferior, promovendo um hidrograma de ruptura bem semelhante ao I0, onde o pico transcorreu em 15 segundos com vazão de 109.244 m³/s.

A suposição I2, que considera a ruptura a partir da estrutura superior, apresentou uma queda inicial menor, portanto evidenciou pico mais baixo, de 24.287 m³/s em 20 segundos, e processo geral mais lento em relação aos outros cenários.

5.2.1 HEC-HMS

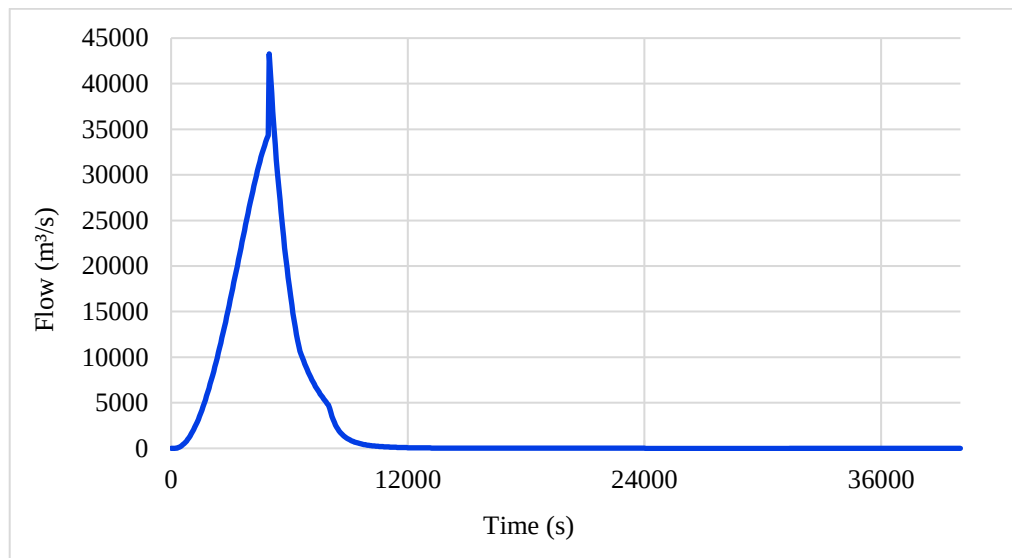
A brecha do rompimento calculada no software HEC-HMS está apresentada na Figura 50 e gerou um hidrograma de ruptura cujo pico ocorreu em 1:23 horas e teve vazão de 43.272 m³/s, conforme exposto na Figura 51.

Figura 50 – Armazenamento do reservatório em decorrência da brecha de ruptura.



Fonte: Autora.

Figura 51 - Hidrograma de ruptura gerado no HEC-HMS para o cenário de *piping*.



Fonte: Autora.

5.3 MANCHAS DE INUNDAÇÃO

Os resultados para a propagação dos fluidos mostraram maiores diferenças principalmente no sentido longitudinal do escoamento, conforme ilustra a Figura 52. Longitudinalmente, a simulação 2, que considera coeficiente de *manning* alto (não real), foi o cenário que mais avançou a jusante. Ainda que as simulações 1 e 3 sejam visualmente semelhantes, é possível observar que a simulação 1 possui uma extensão maior, ao passo que a simulação 3, em determinadas regiões, apresenta uma abrangência transversal relativamente superior às demais simulações. Portanto, fluidos com menores propriedades viscosas atingem áreas mais distantes ainda que haja um coeficiente de rugosidade elevado.

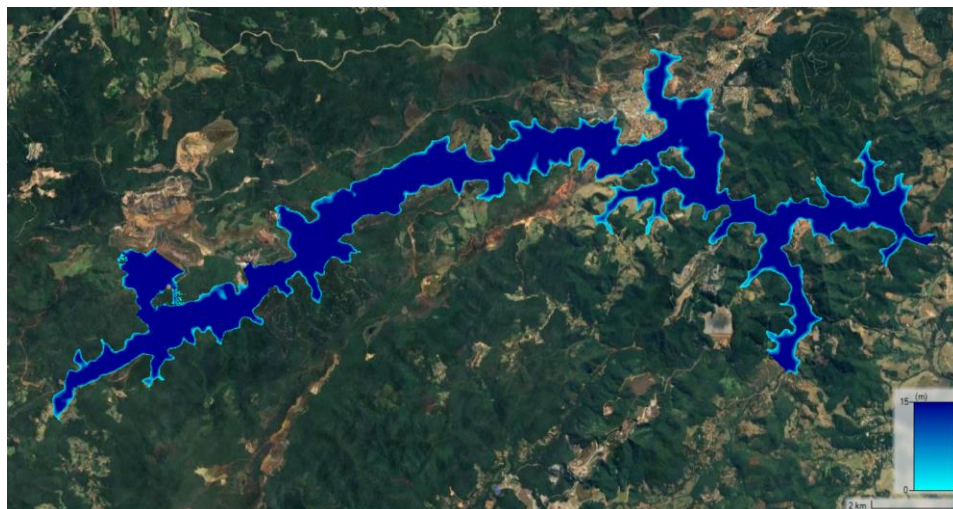
A Figura 53 e a Figura 54 evidenciaram que, com exceção da seção 1, embora o comportamento do rejeito (simulação 3) seja diferente de um fluido newtoniano, a lamina

d'água e as profundidades atingidas pelo material são semelhantes aos valores atingidos pelo cenário newtoniano com *manning* normal médio (simulação 1). Entretanto, o cenário com *manning* alto (simulação 2) apresentou diferenças significativas em relação aos demais.

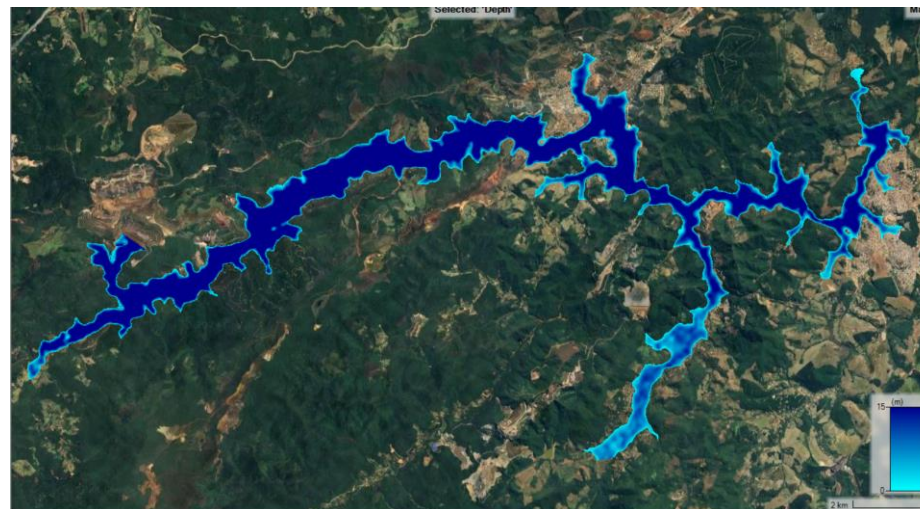
O trecho inicial de escoamento apresentou velocidades máximas semelhantes para a simulação 1 e 3, porém o rejeito atingiu seu pico aos 650m enquanto a água atingiu aos 1750m. Conforme se afasta do barramento, é possível notar que as velocidades para o rejeito são excessivamente maiores que as outras duas situações, conforme a Figura 55 (a e b).

Figura 52 – Manchas de inundação para o cenário de *piping*.

Simulação 1 - Cenário 1 (*piping*) - Fluido Newtoniano (0,03 - manning)



Simulação 2 - Cenário 2 (*piping*) - Fluido Newtoniano (0,3 - manning)



Simulação 3 - Cenário 3 (*piping*) - Fluido Não-Newtoniano (0,03 - manning)



Fonte: Autora.

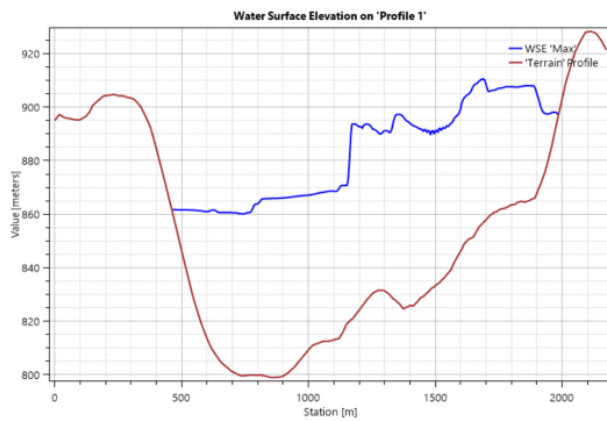
Figura 53 – Comparação gráfica Simulação x Seção – Lâmina d'água.

a)

Lâmina d'água

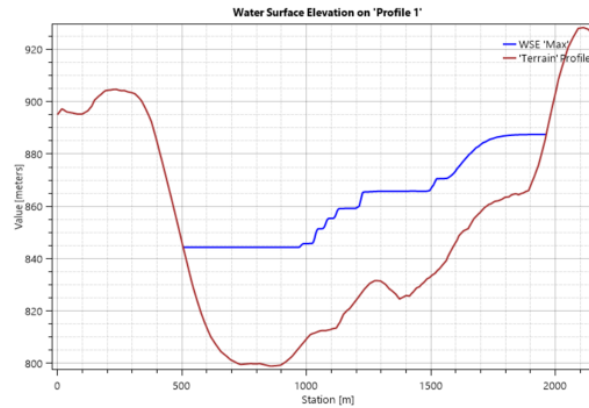
Simulação 1

Seção 1



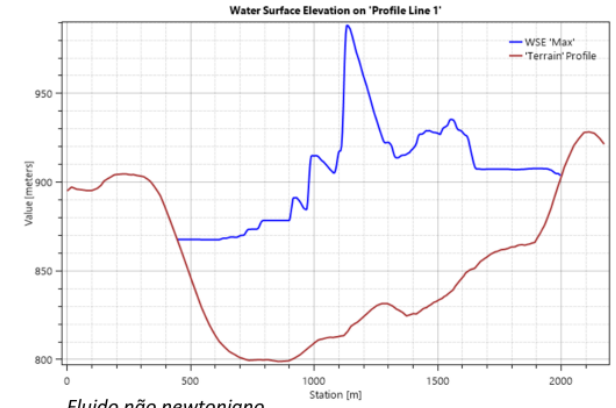
Fluido newtoniano
Manning 0,03

Simulação 2



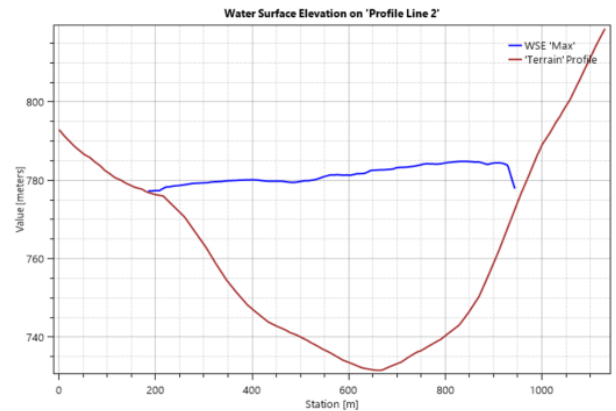
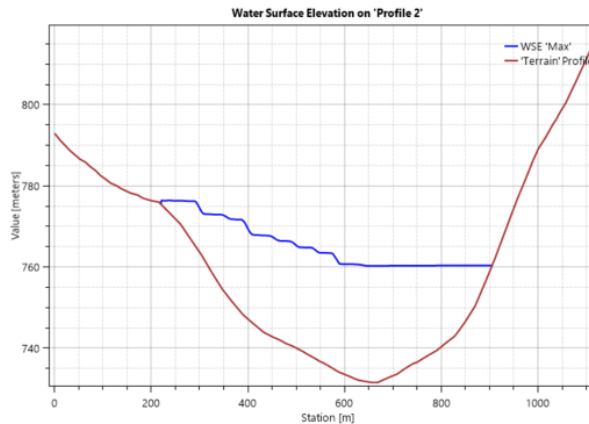
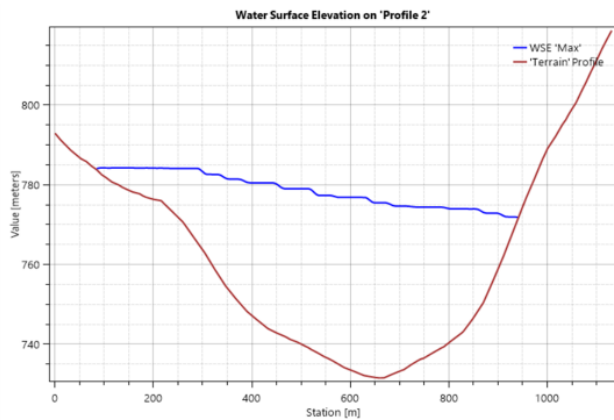
Fluido newtoniano
Manning 0,3

Simulação 3



Fluido não newtoniano
Manning 0,03

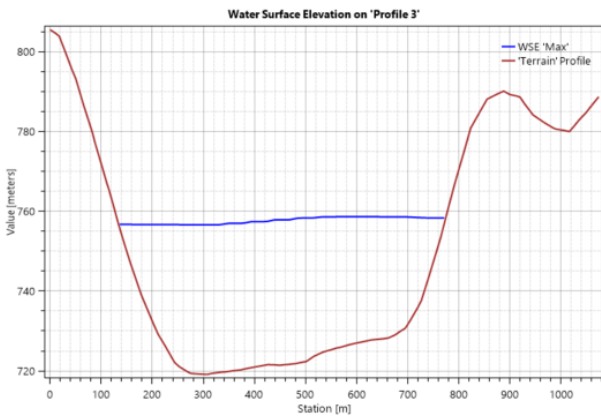
Seção 2



b)

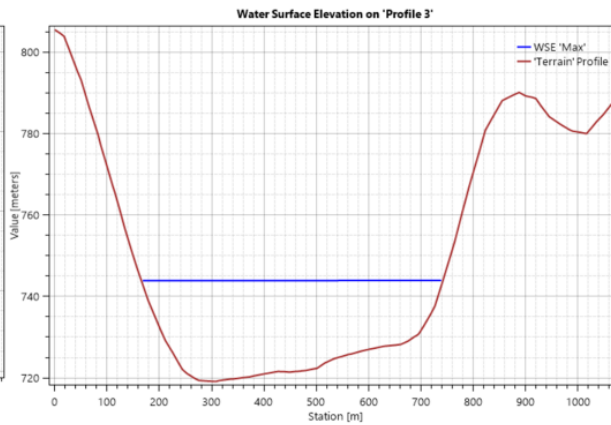
Lâmina d'água

Simulação 1



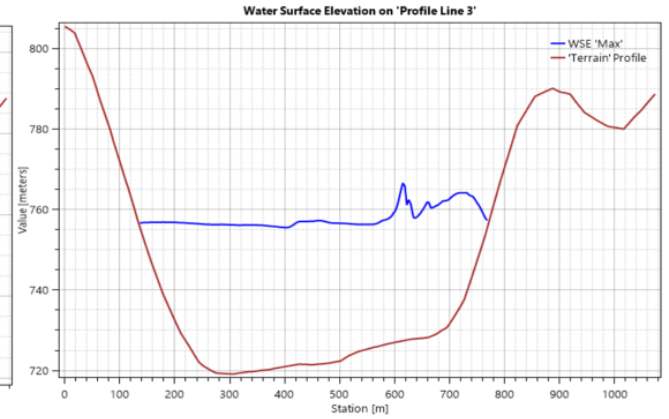
Fluido newtoniano
Manning 0,03

Simulação 2



Fluido newtoniano
Manning 0,3

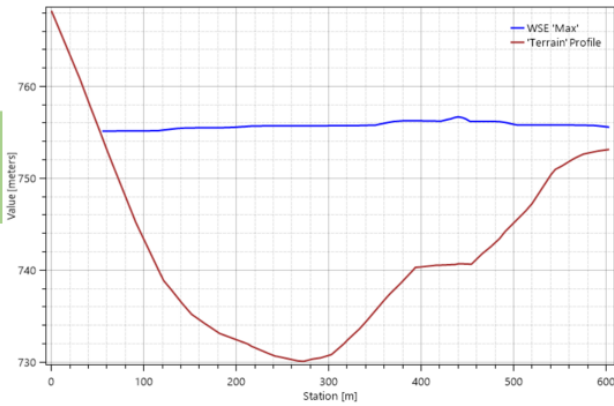
Simulação 3



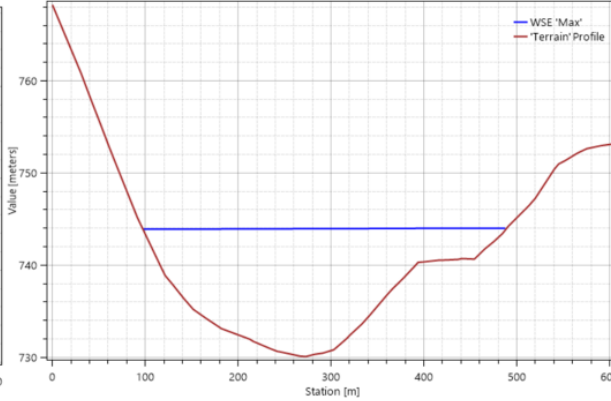
Fluido não newtoniano
Manning 0,03

Seção 3

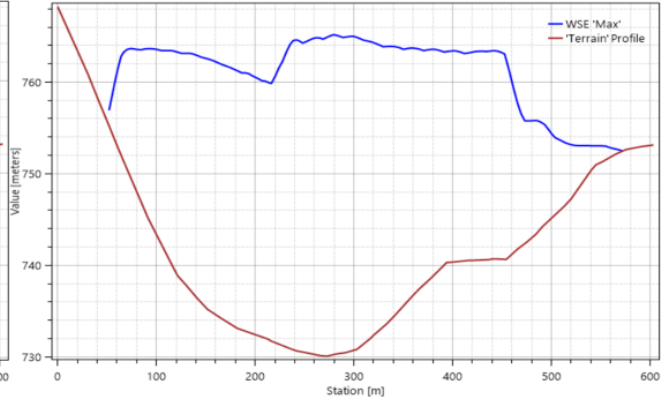
Water Surface Elevation on 'Profile 4'



Water Surface Elevation on 'Profile 4'



Water Surface Elevation on 'Profile Line 4'



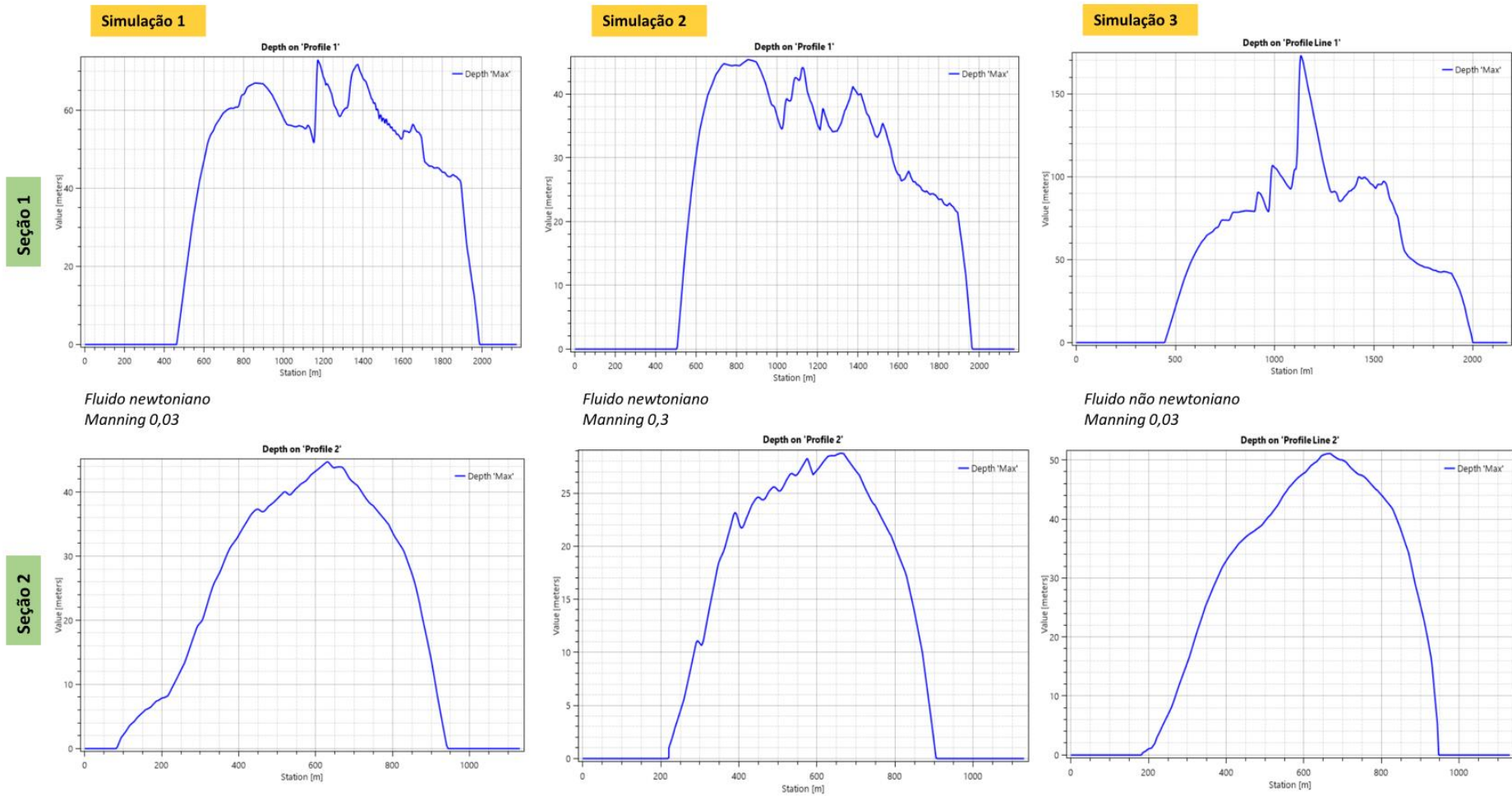
Seção 4

Fonte: Autora.

Figura 54 – Comparação gráfica Simulação x Seção – Profundidade.

a)

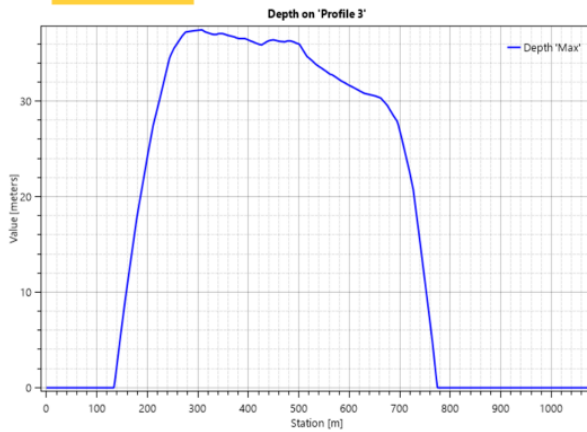
Profundidade



b)

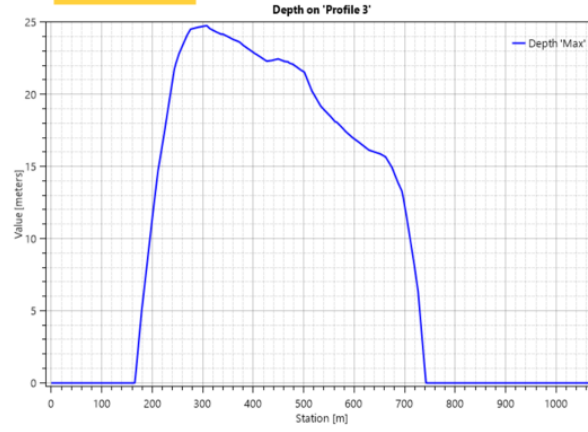
Profundidade

Simulação 1



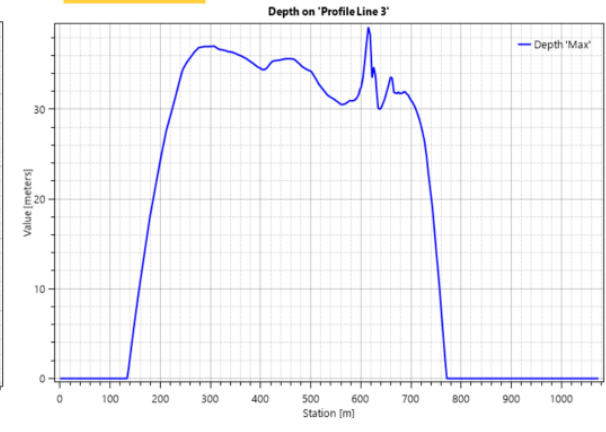
*Fluido newtoniano
Manning 0,03*

Simulação 2



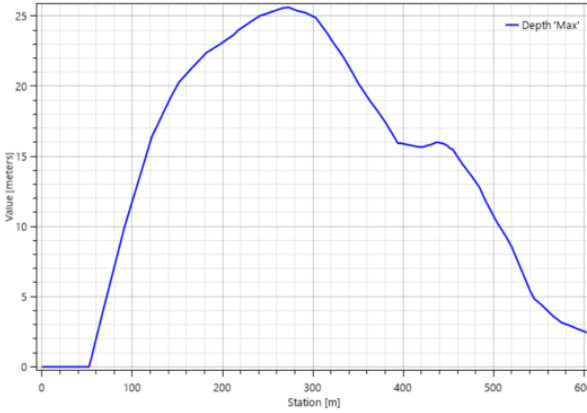
*Fluido newtoniano
Manning 0,3*

Simulação 3



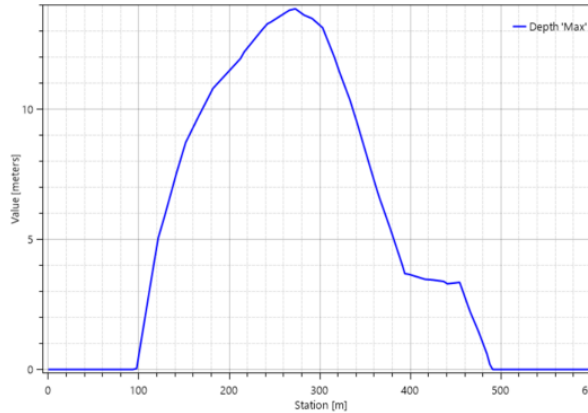
*Fluido não newtoniano
Manning 0,03*

Depth on 'Profile 4'

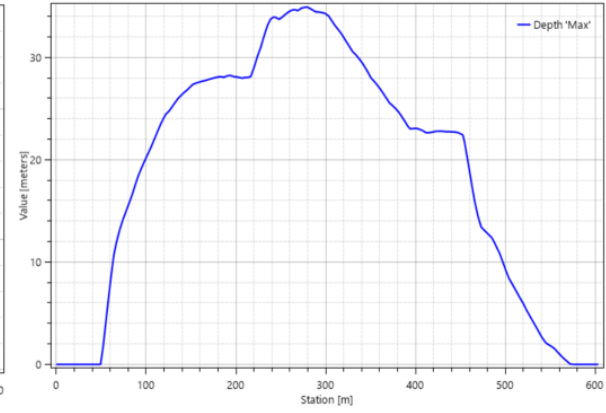


Seção 4

Depth on 'Profile 4'



Depth on 'Profile Line 4'

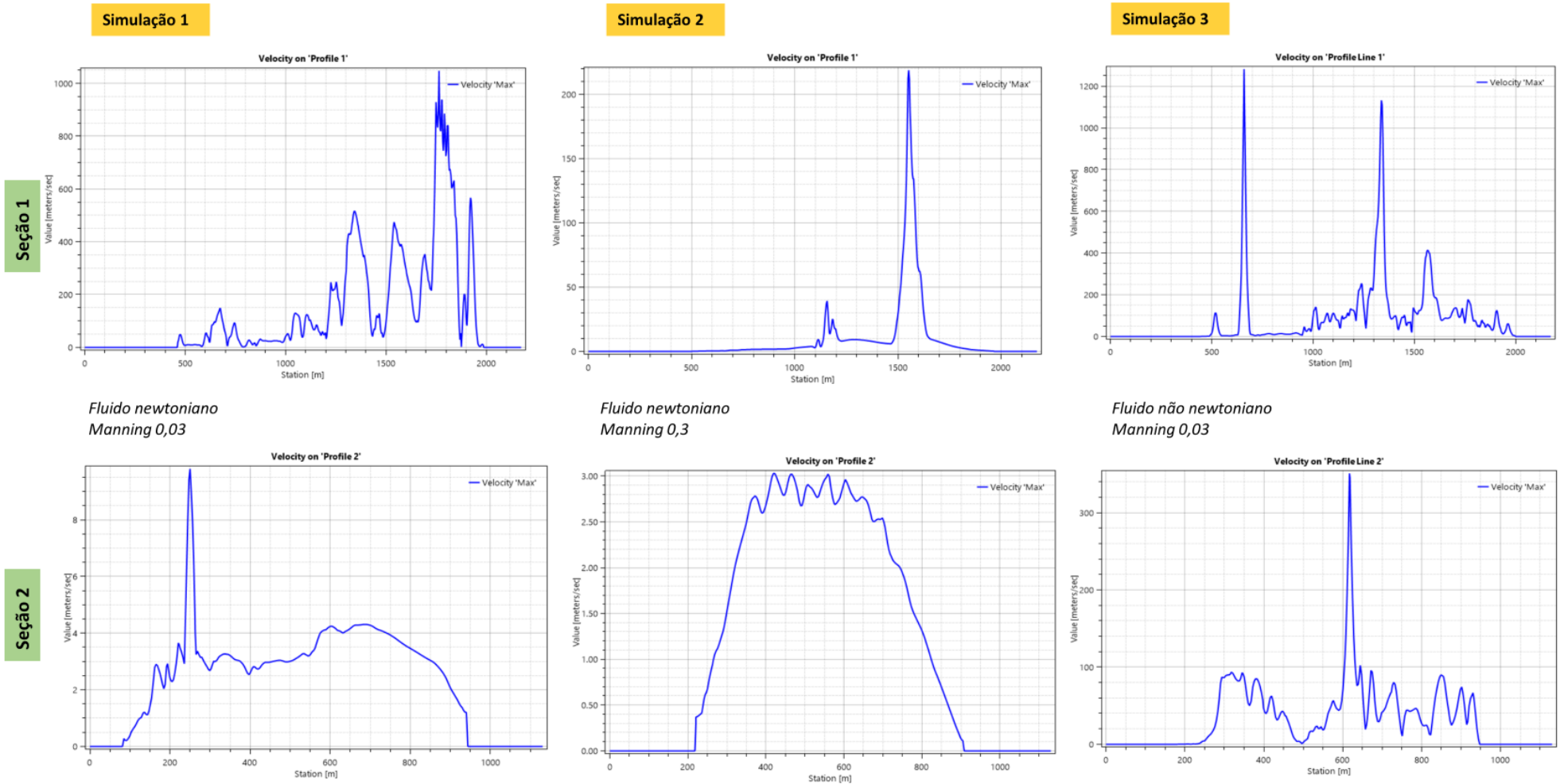


Fonte: Autora.

Figura 55 – Comparação gráfica Simulação x Seção – Velocidade.

a)

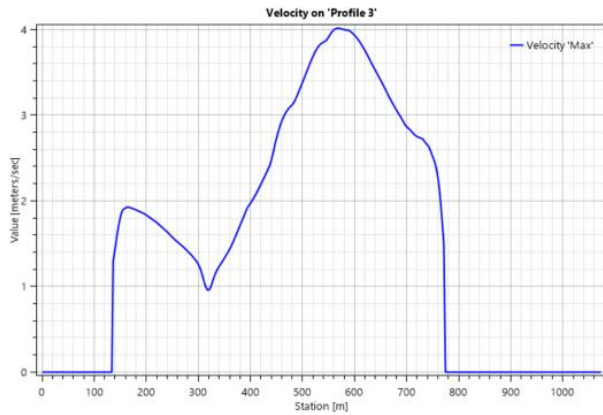
Velocidade



b)

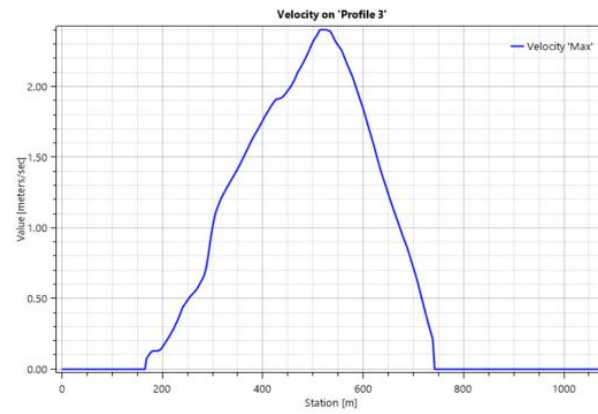
Velocidade

Simulação 1



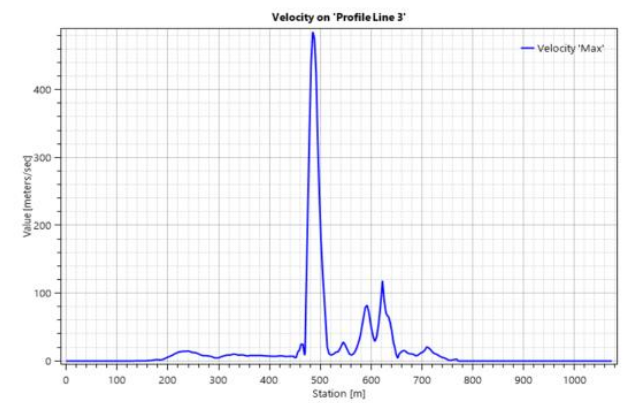
Fluido newtoniano
Manning 0,03

Simulação 2

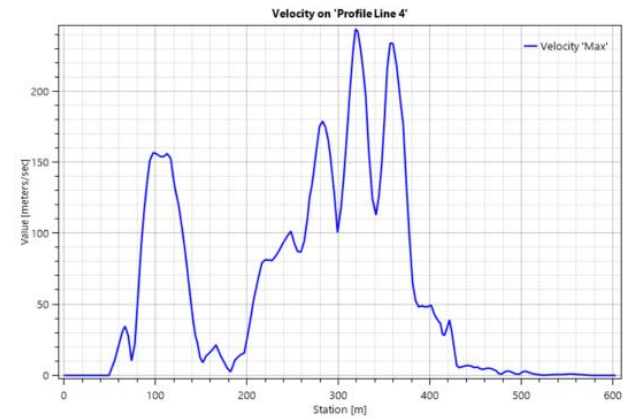
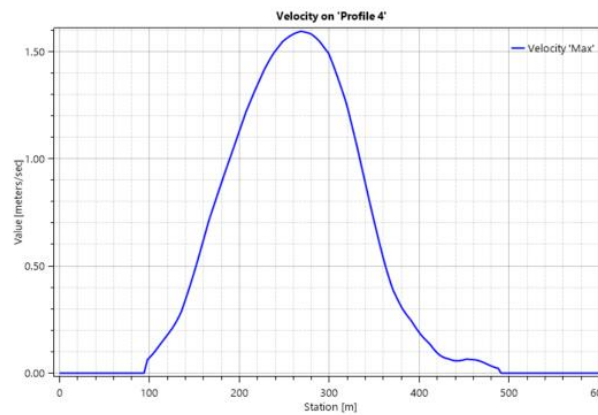
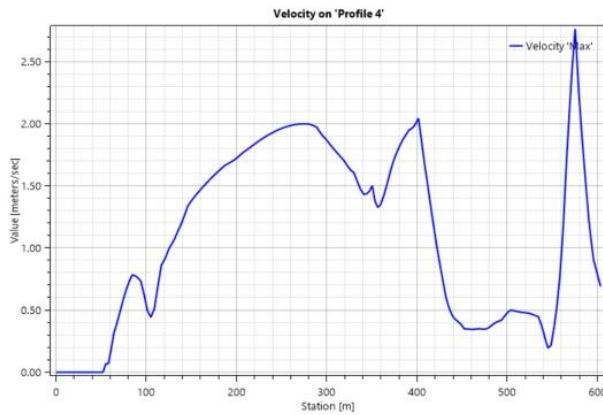


Fluido newtoniano
Manning 0,3

Simulação 3



Fluido não newtoniano
Manning 0,03

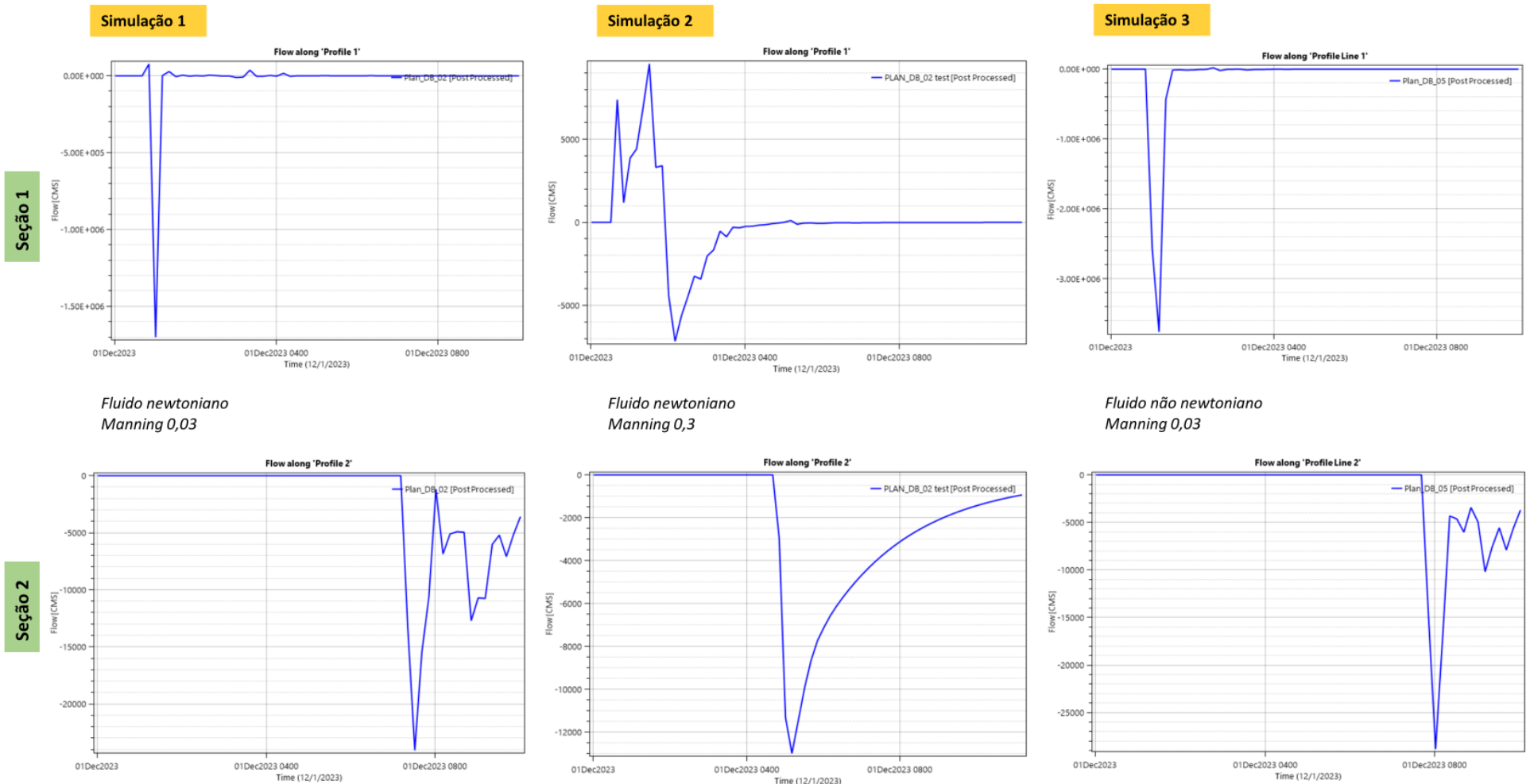


Fonte: Autora.

Figura 56 – Comparação gráfica Simulação x Seção – Vazão de Pico.

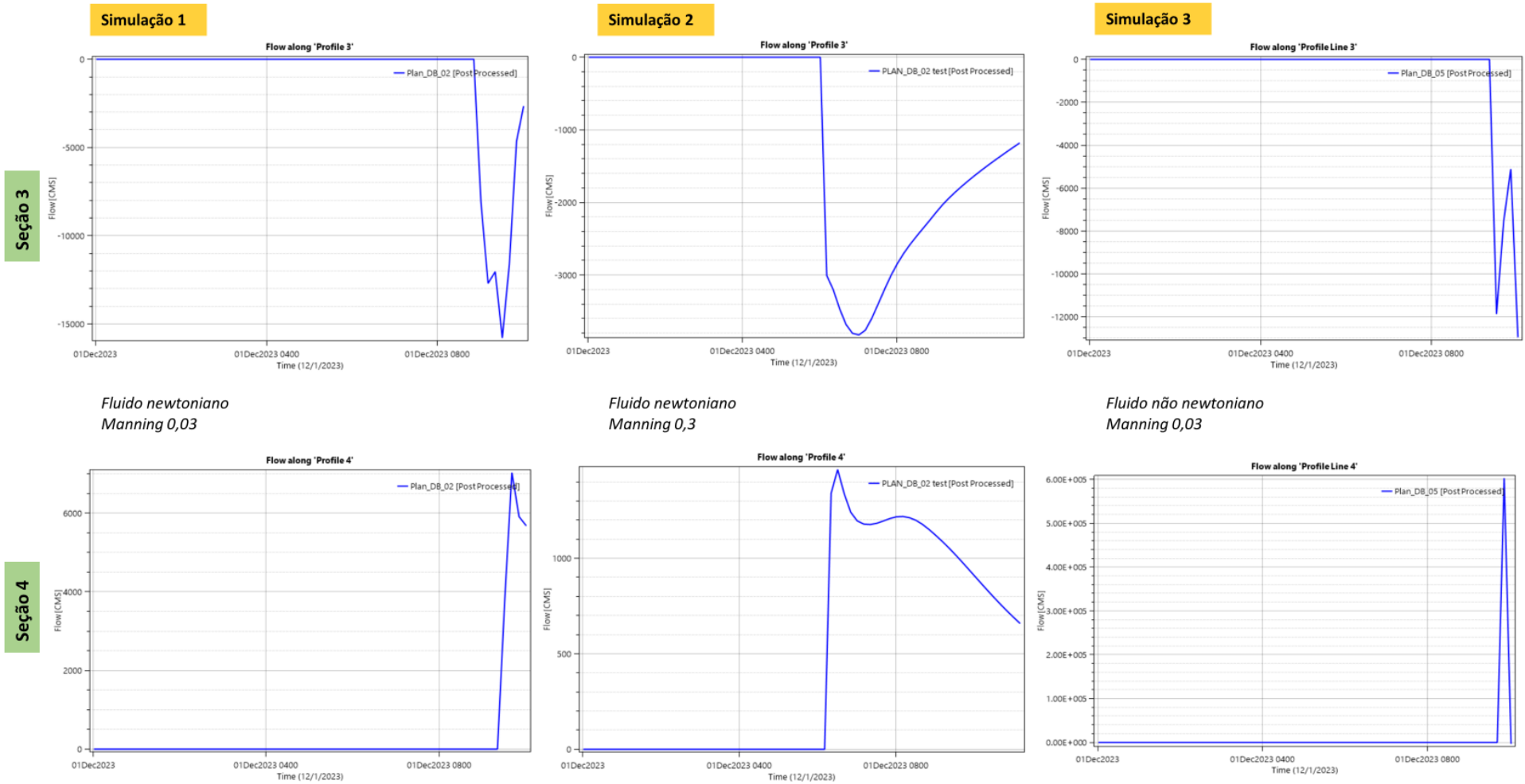
a)

Vazão de pico



b)

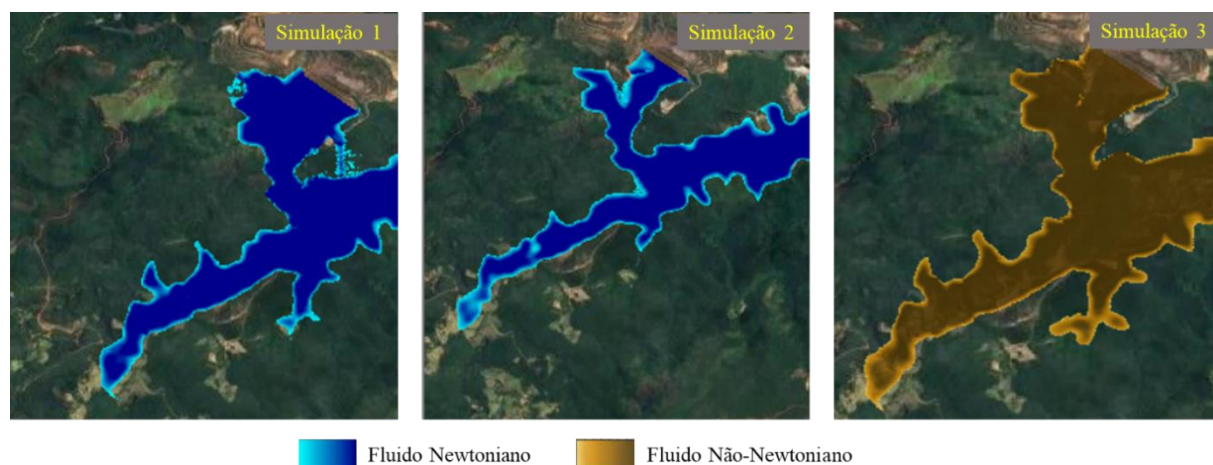
Vazão de pico



Fonte: Autora.

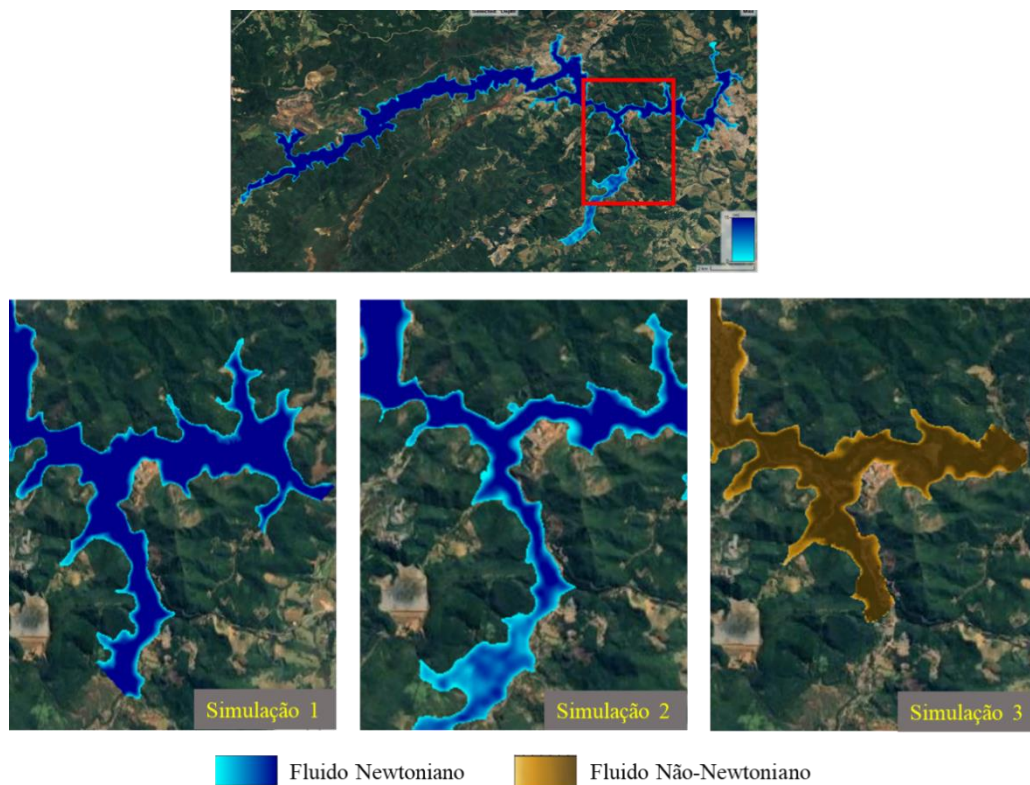
A Figura 57, esclarece que transversalmente o material que possui propriedades viscosas consegue atingir regiões maiores. O trecho demarcado na Figura 58 dista 19,34 km da barragem ao longo do escoamento e, por meio dele, é possível verificar a diferença longitudinal que os fluidos alcançaram, sendo que a simulação 2 atingiu maior área e o fluido mais viscoso, teve a menor propagação.

Figura 57 – Comparativo dos modelos na região próxima à barragem



Fonte: Autora.

Figura 58 – Comparativo dos modelos em um trecho ao longo do escoamento



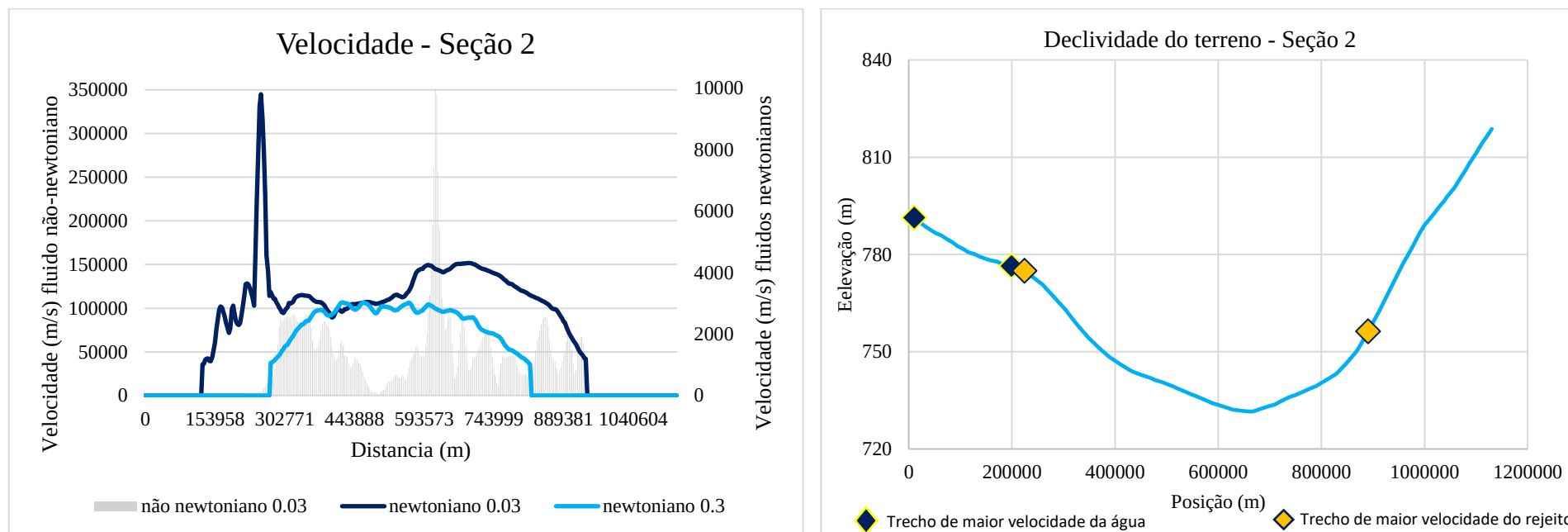
Fonte: Autora.

Torna-se evidente que a variação dos parâmetros reológicos impactou significativamente na seção mais a jusante ao longo do escoamento (seção 4), a cerca de 20 km da barragem. Dessa forma, avaliar a sensibilidade da modelagem a parâmetros reológicos com relação a tempos de chegada, se torna mais relevante à medida que as áreas de interesse se afastam da estrutura.

Os gráficos apresentados nas Figura 59, Figura 60 e Figura 61, são um comparativo da velocidade entre as simulações para cada seção e a declividade correspondente. Nos gráficos os valores do eixo direito correspondem a velocidade dos fluidos newtonianos, enquanto o eixo a esquerda representa os valores de velocidade do fluido não-newtoniano.

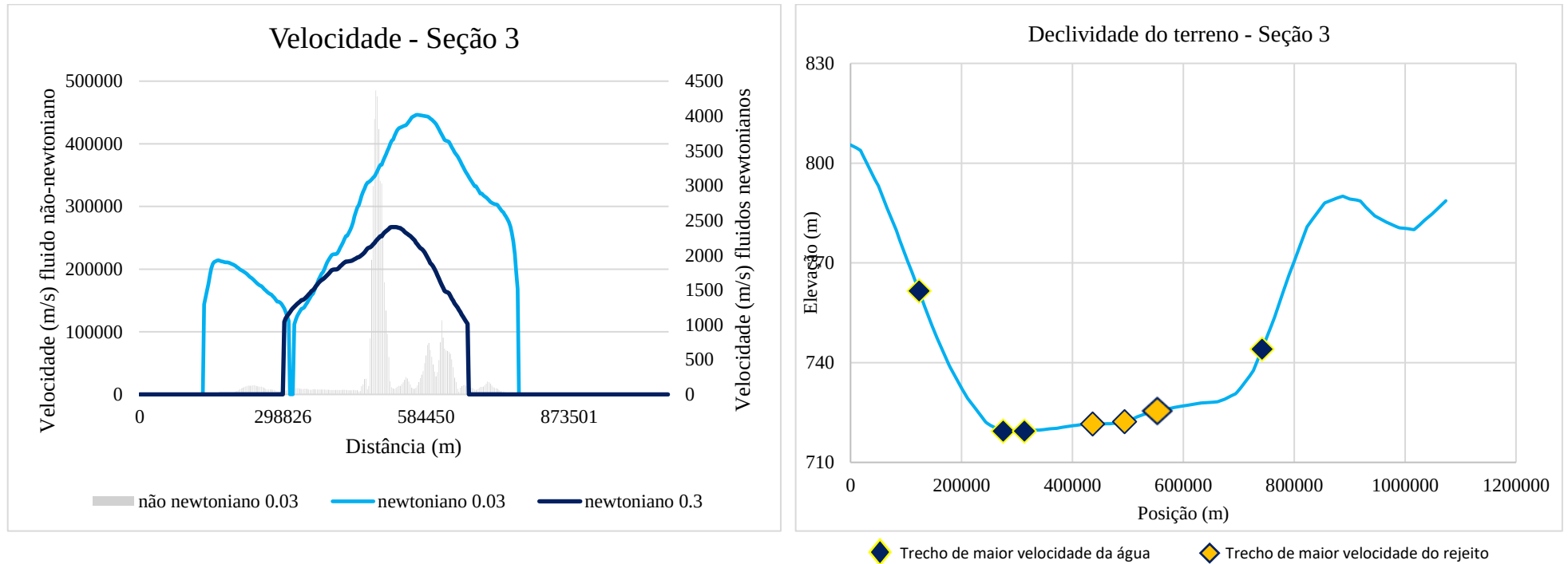
Nos gráficos que exibem a declividade das seções, foram marcados pontos que indicam as regiões onde houve picos de velocidade. É possível observar que nas áreas onde os fluidos newtonianos apresentam uma aceleração o fluido não-newtoniano apresenta uma redução da sua velocidade. Em contrapartida, em regiões de declividade acentuada o fluido não-newtoniano apresentou uma aceleração expressiva, ou seja, seu aumento da velocidade está associado à declividade do terreno.

Figura 59 – Velocidade dos fluidos ao longo do escoamento na seção 2.



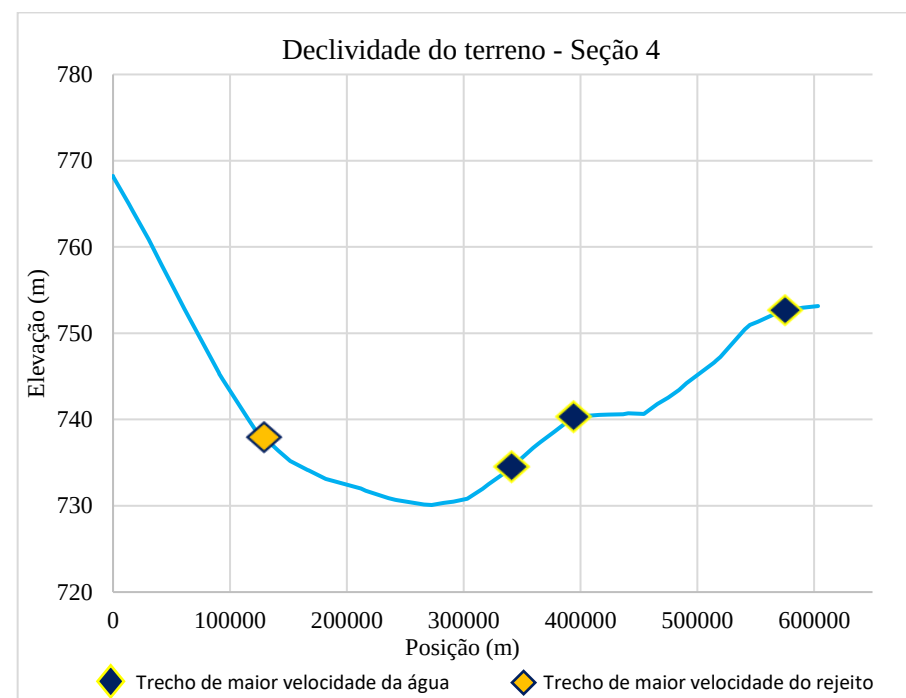
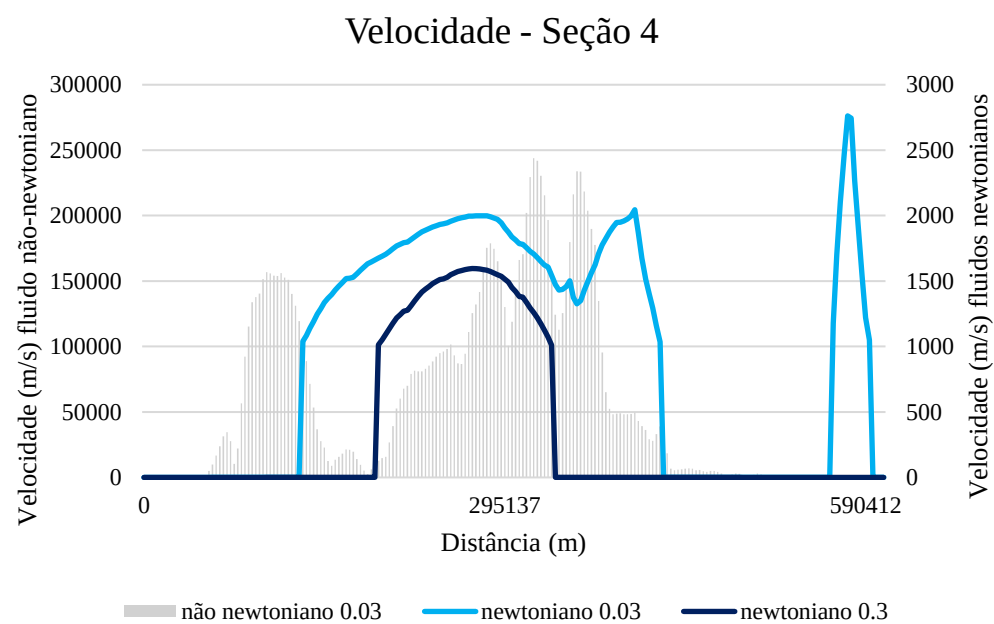
Fonte: Autora.

Figura 60 – Velocidade dos fluidos ao longo do escoamento na seção 3.



Fonte: Autora.

Figura 61 – Velocidade dos fluidos ao longo do escoamento na seção 4.

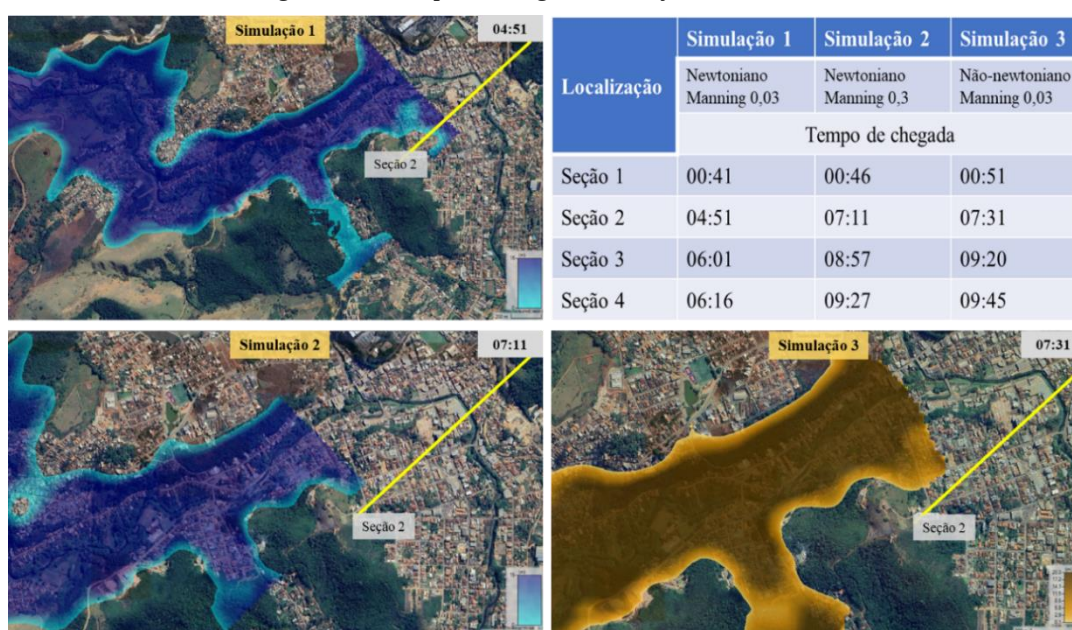


Fonte: Autora.

5.3.1 Tempo de chegada

Inicialmente, avaliou-se a variação do tempo de chegada nas seções de análise do modelo, Figura 62. A maior variação (35,7%), em relação ao tempo máximo obtido, ocorreu na última seção do modelo (seção 4), onde o tempo de chegada da onda para a simulação 3 variou 209 minutos acerca da simulação 1. Já a menor divergência ocorreu na seção 1, sendo essa seção localizada na região à jusante da estrutura, na transição entre o vale encaixado e a planície de inundação no terreno, tratando-se de uma variação de 5 minutos entre cada simulação.

Figura 62 – Tempo de chegada nas seções de interesse.



Fonte: Autora.

De forma geral, os tempos de chegada para as simulações 2 e 3 apresentaram uma variação de 18 a 23 minutos, o que corresponde a uma disparidade de aproximadamente 4%, exceto na primeira seção. No caso da simulação 1, constatou-se que o tempo de chegada em todas as seções de interesse é, aproximadamente, 35% menor que os outros cenários.

Os resultados obtidos para esse estudo de caso indicam que parâmetros como a declividade do terreno, coeficiente de rugosidade, dentro outros, podem influenciar mais os resultados de tempo de chegada do que a variação das propriedades reológicas.

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO

Para a avaliação das diferenças na propagação da mancha de inundação em decorrência da variação dos fluidos e do coeficiente de *manning*, foram simulados três cenários, conforme:

- Simulação 1 (Sim1) – simulação considerando o *manning* estabelecido para o local (0,03) e o fluido propagado água (fluido newtoniano);
- Simulação 2 (Sim2) – simulação considerando a metodologia de aumento de *manning* extremo (0,3), proposto por Raman e Liu (2019) e fluido newtoniano;
- Simulação 3 (Sim3) – simulação para o cenário de fluido não-newtoniano (rejeito) considerando as propriedades do fluido (plástico de Bingham), descrita no item 4.6, e o *manning* estabelecido para o local (0,03).

Conforme evidencia o Quadro 24, o teste de *Wilcoxon* indicou que não há diferença significativa entre os valores de profundidade obtidos para as mesmas seções transversais entre os dados propagados considerando os fluidos newtoniano e o não-newtoniano com *manning* médio normal. Contudo, para distribuição com *manning* alto há diferença significativa entre todas as seções analisadas.

Quadro 24 - Teste *Wilcoxon* - P- valor (Profundidade).

Seção 2		
#	Sim 1	Sim 2
Sim 2	<0.05	-
Sim 3	0.13	<0.05
Seção 3		
#	Sim 1	Sim 2
Sim 2	<0.05	-
Sim 3	0.55	<0.05
Seção 4		
#	Sim 1	Sim 2
Sim 2	<0.05	-
Sim 3	<0.05	<0.05

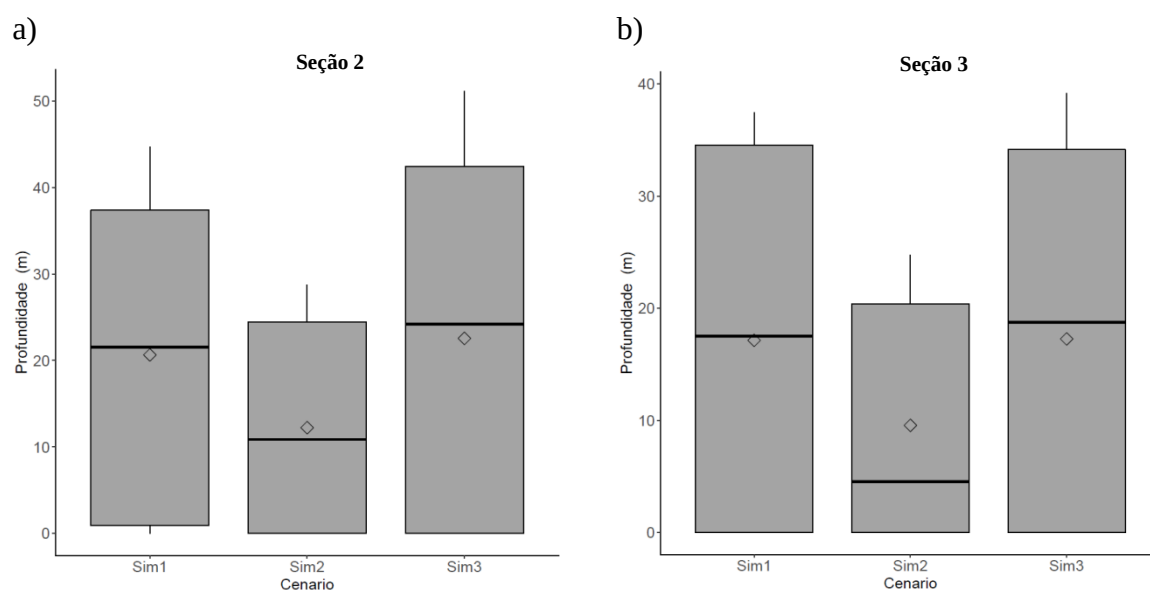
A análise da profundidade através dos *boxplots* não considerou os dados da seção 1 por não ser considerada representativa devido sua localização em uma região muito próxima a área de ruptura. Para as seções 2 e 3, Figura 63 (a) e (b), a distribuição média normal do coeficiente de *manning* forneceu valores de profundidade máxima semelhantes para os fluidos newtoniano (sim1) e não-newtoniano (sim3). Já para a distribuição alta (não real) do coeficiente de *manning*

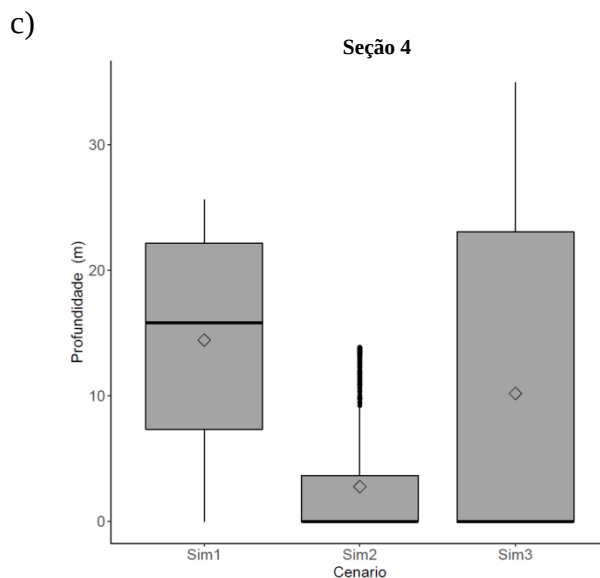
com fluido newtoniano, houve uma diferença significativa da profundidade máxima atingida em relação aos cenários gerados pela distribuição média normal.

Através do *boxplot* da seção 4 apresentado na Figura 63 (c), é possível concluir que todos os cenários representam uma variação expressiva. Para sim1 e sim3 conclui-se que a variação observada está relacionada ao comportamento dos fluidos e a viscosidade, uma vez que para o fluido newtoniano (sim1) a mediana das profundidades máximas é de 16m com média de 15m, enquanto o fluido não-newtoniano (sim3) tem mediana igual a 0m e média de 10m.

É importante destacar que ao longo do escoamento observa-se que ocorre a diminuição da profundidade máxima nas seções, fato justificável devido a redução da velocidade longo do escoamento.

Figura 63 – *Boxplot* das profundidades máximas obtidas a partir da variação do tipo de fluido e das distribuições do coeficiente de *manning* normal médio e alto – seção 2, 3 e 4.



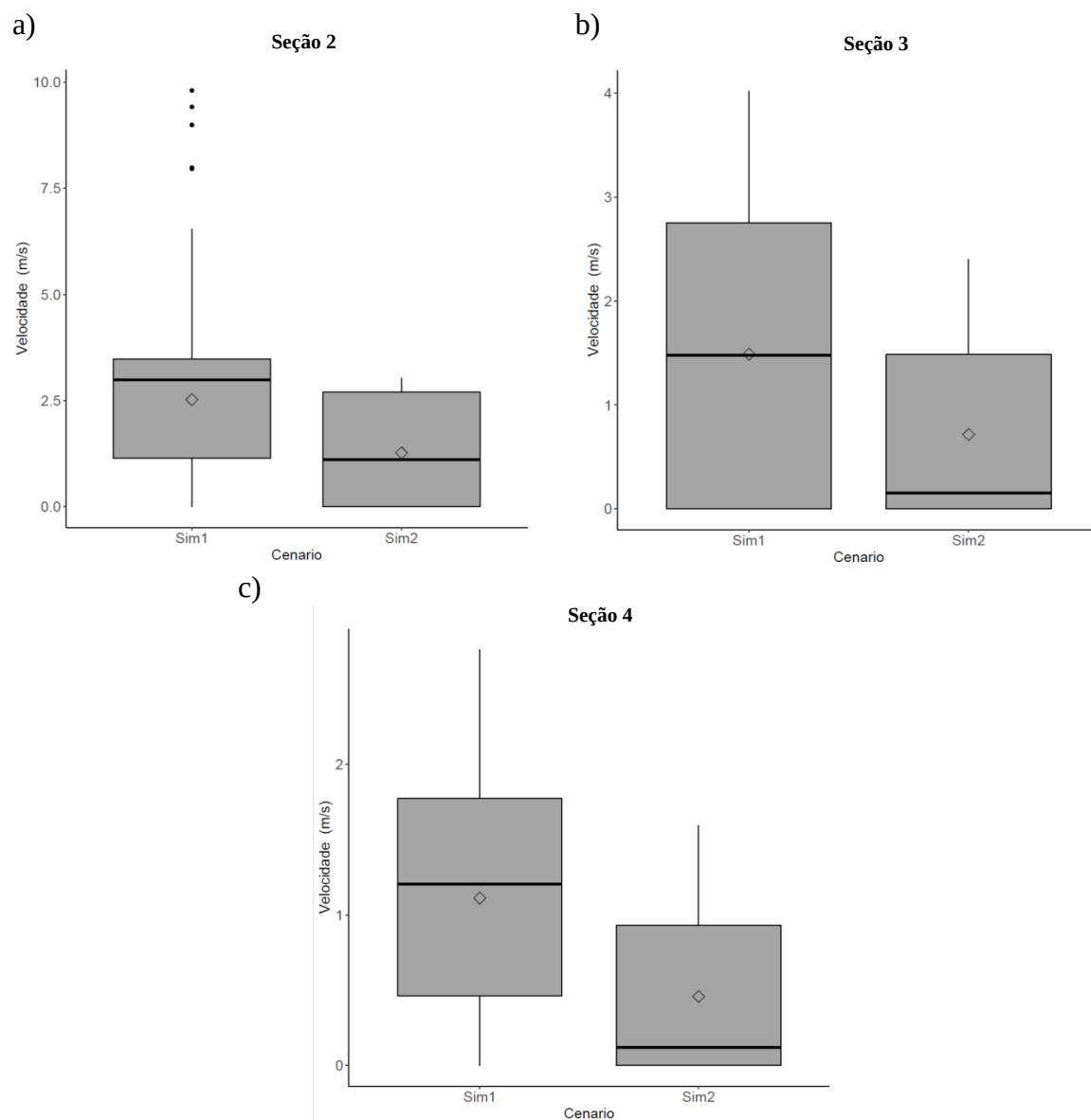


Fonte: Autora.

Para análise da variação da velocidade foram construídos *boxplots* considerando apenas a Sim1 e Sim2, visto que a Sim3 não era parâmetro por apresentar imprecisões em seus dados. A seção 1 foi desprezada por não ser representativa devido as velocidades muito altas em decorrência da sua localização muito próxima a área de ruptura.

Através da Figura 64 observa-se que a velocidade apresentou uma variação expressiva para ambos os cenários. Em todas as seções consideradas, a velocidade da sim1 é relativamente maior do que a velocidade da sim2, o que faz sentido visto que o coeficiente de *mannig* para sim2 é muito alto justamente para que haja um retardo da velocidade da onda propagada afim de simular o comportamento de um fluido não-newtoniano. Dessa forma, para sim1 a mediana das velocidades máximas é de aproximadamente 2,75 m/s com média de 2,5 m/s, enquanto a sim2 tem mediana e média, aproximadamente, 1,25 m/s e 1,28 m/s, respectivamente.

Figura 64 - *Boxplot* das velocidades máximas obtidas a partir da variação das distribuições do coeficiente de *manning* normal médio e alto – seção 2,3 e 4.



Fonte: Autora.

Conforme o Quadro 25, o teste de *Wilcoxon* para a verificação da velocidade entre Sim1 e Sim2, indicou diferenças significativas para todas as seções analisadas, ou seja, $p\text{-valor} < 0.05$ nas seções 2, 3 e 4.

Quadro 25 - Teste *Wilcoxon* - P- valor (Velocidade).

Seção 2	
Sim1 – Sim 2	< 0.05
Seção 3	
Sim1 – Sim 2	< 0.05
Seção 4	
Sim1 – Sim 2	< 0.05

6 CONCLUSÕES

É possível concluir que quanto menor a propriedade viscosa de um fluido, maior será a sua propagação longitudinalmente. Entretanto, fluidos com maiores propriedades viscosas/reológicas, apesar de atingir uma distância menor, conseguem percorrer uma área transversal maior. Destaca-se que em uma visão macro, para o fluido newtoniano e não-newtoniano com rugosidade média normal, as diferenças não foram tão evidentes como observado transversalmente. Contudo, para o fluido newtoniano com rugosidade alta, as diferenças da área inundada foram incontestáveis.

Mesmo que a rugosidade não real de 0,3 retarde o tempo de chegada e resulte em velocidades de escoamento mais lentas, a extensão da inundação é muito superior aos cenários de rugosidade média normal, o que não é vantajoso, principalmente em estudos que objetivam o mapeamento de zonas de risco, como PAEBM. Isso acontece porque a rugosidade alta apenas retarda a velocidade da onda de inundação, porém o fluxo permanece com comportamento de um fluido newtoniano. Dessa forma, pode-se considerar que estudos baseados nessa metodologia podem estar equivocados em relação à delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS), o que traria risco a população residente à jusante destas estruturas.

Conforme os hidrogramas de ruptura, a região próxima a barragem e o trecho localizado a aproximadamente 20 km do barramento mostram que, uma vez que a onda newtoniana chega, ela permanece fluindo. Em contrapartida, a abordagem não newtoniana mostra que quando a onda chega ela tende a permanecer, o que requer mais energia para se mover a jusante. Ainda, uma vez que o peso do fluxo atua como uma força adicional que favorece a aceleração na direção do fluxo, em áreas onde o terreno tem uma inclinação acentuada, o fluido não-newtoniano pode se mover mais rápido que o fluido newtoniano. No entanto, em áreas planas, esse peso do fluxo faz com que o fluido não-newtoniano desacelere, o que torna sua movimentação consideravelmente mais lenta em relação aos fluidos newtonianos.

Constatou-se que os hidrogramas de ruptura modelados em softwares diferentes influenciam no resultado do modelo hidrodinâmico, uma vez que, diferente do HEC-RAS, o EMBREA-MUD considera os parâmetros reológicos do fluido como dados de entrada.

Com relação aos resultados de tempo de chegada, evidenciou-se que a variação dos parâmetros reológicos teve um impacto maior em regiões mais distantes da barragem. Isso foi mais evidente através dos resultados da última seção dos cenários simulados, onde o tempo de chegada sofreu maior variação.

Em síntese, a análise da modelagem não-newtoniana é relevante diante da elevada variabilidade dos parâmetros reológicos disponíveis na literatura para rejeitos provenientes do mesmo tipo de minério. A modelagem não-newtoniana no HEC-RAS é recente, e apresenta complexidade e incertezas na representação desses escoamentos, uma vez que a estimativa dos parâmetros de rompimento da barragem, hidrograma de ruptura; e extensão e severidade da inundação a jusante estão associadas à experiência e conhecimento do responsável pela modelagem.

Por fim, os modelos hidrodinâmicos comprovaram a importância da caracterização reológica do fluido em estudos de *Dam Break* e em complemento a isso, a influência da variação do coeficiente de *manning* no tempo de chegada e na velocidade da onda.

7 TRABALHOS FUTUROS

Diante dos desafios e dos resultados discutidos nesse trabalho, propõem-se para estudos futuros:

- Comparação de modelos hidrodinâmicos considerando escoamentos não-newtonianos, bem como diferentes modelos reológicos, a fim de obter a influência dos modelos sobre os resultados;
- Realizar análises de sensibilidade no modelo em relação às variáveis de entrada, objetivando obter uma quantificação da influência dos parâmetros de entrada nos resultados obtidos;
- Avaliar a simulação alterando as propriedades reológicas do fluido não-newtoniano, como a concentração volumétrica, a tensão de escoamento e as viscosidades dinâmicas;
- Levantamento topográfico mais detalhado da região de estudo e batimetria da calha fluvial do rio, a fim de obter refinar o modelo e obter resultados mais detalhados;
- Análise da variação do coeficiente de *manning* seguindo outras distribuições, diferentes da média normal e da alta não real para analisar a possibilidade de um cenário similar ao fluido não-newtoniano.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, I.M. **Propagação De Incerteza Do Coeficiente De Manning Em Modelos Numéricos 2d De Escoamento Hidráulico Gerado Pelo Rompimento Hipotético De Barragem**. Orientador: Hersília de Andrade e Santos. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em ENGENHARIA CIVIL) - Departamento de engenharia civil, Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais – CEFET, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: < <https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo?idArquivo=4084681&key=fdced75e95301c5608448a27daf911e1> >. Acessado em: 30 jun. 2022.

ANA - Agência Nacional De Águas (2021). **Relatório de segurança de barragens**. Disponível em: < <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020/rsb-2020.pdf> > Acessado em: 03 jul. 2021.

ANA - Agência Nacional De Águas e Saneamento Básico. **Definições importantes sobre segurança de barragens**. ANA, 2022. Disponível em: < https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/outros/definicoes-importantes-sobre-seguranca-de-barragem.pdf/view >. Acessado em: 05 jul. 2024.

ANA - Agência Nacional De Águas. **Relatório de segurança de barragens 2015**. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: < https://www.apac.pe.gov.br/images/media/Relatorio_Seguranca/RelatorioSegurancaBarragens_2015VejaErrata.pdf >. Acessado em: 31 dez. 2023.

ANM – Agência Nacional De Mineração (2021). **SIGBM Público**. Disponível em: < <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem> >. Acessado em: 11 set. 2021.

ANM – Agência Nacional De Mineração (2021). **SIGBM Público**. Disponível em: < <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/ClassificacaoNacionalDaBarragem> >. Acessado em: 16 fev. 2022.

ANM – Agência Nacional De Mineração (2022). **Report Mensal Barragens de Mineração – Julho**. 31 jul. 2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/boletim-mensal-julho-2022.pdf> >. Acessado em: 31 dez. 2023.

ANM – Agencia Nacional De Mineração (2023). **Exploração mineral**. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/exploracao-mineral> >. Acessado em: 25 dez. 2023.

BAPTISTA, M.B; COELHO, M.M.L.P. Fundamentos de engenharia hidráulica. 3ª ed. rev. e ampl. – Belo Horizonte. Editora UFMG, 2010. Disponível em: < http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/Doce/CBH/relatorios/PIRH_Doce_Volume_I.pdf >. Acessado em: 13 de fevereiro de 2021.

BAGNOLD, R. A. **Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear**. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 225(1160), 49–63, 1954. Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/99440> >. Acessado em: 16 fev. 2022.

BINGHAM, E.C. **An investigation of the laws of plastic flow**, *Bull.* 1916. Bureau Standard., 13, 309-353. Disponível em: < <https://doi.org/10.6028/bulletin.304> >. Acessado em: 16 fev. 2022.

BOWLES, D. **ALARP assessment: Using cost-effectiveness and desproportionality to justificar redução de risco**. *Proceedings of the Australian Committee on Large Dams Risk Workshop*, outubro de 2003, Launceston, Tasmania - Austrália, 2003.

BRASIL. **Presidência da República. Casa Civil. Subsecretaria de Assuntos Jurídicos. Lei 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. *Diário Oficial da União*, 21 set. 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm >. Acessado em: 01 jun. 2021.

BOWKER, LN; Chambers, DM. **O Risco, Responsabilidade Pública e Economia de Falhas em Instalações de Armazenamento de Rejeitos**. *Lei de Terraplenagem*. 2015

BOWKER, LN; Chambers, DM. **Causas Raiz dos Rejeitos Galgamento de Barragens: A Economia do Risco e Consequência**. In: 2 Seminário Internacional de Proteção de Barragens Contra Galgamento. pés Collins, Colorado, EUA. 2016.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (CCPS). **Guidelines for Hazard Evaluation Procedures**. 2008.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (CCPS). **Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment**. Third Edition. 2001.

CENTER FOR SCIENCE IN PUBLIC PARTICIPATION (CSP2). **Tailings Dam Failures 1915-2021**. Disponível em: < <http://www.csp2.org/technical-reports> >. Acessado em: 6 de out. 2021.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. 1o ed. Tokyo: McGraw-Hill Book Company, 1959.

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

CORREA, R. C. F. **IBGE - Educa | Jovens**. Disponível em: < <https://educa.ibge.gov.br/jovens/materias-especiais/21581-informacoes-atualizadas-sobre-tecnologias-da-informacao-e-comunicacao.html> >. Acessado em: 15 out. 2023.

CYGANIEWICZ, J.M.; SMART J.D. **U.S. Bureau of Reclamation's use of Risk Analysis and Risk Assessment in Dam Safety Decision Making**. In: International Congress On Large Dams, 20., 2000, Beijing, China. Twentieth international congress on large dams - Proceedings. Paris: ICOLD, 2000. v. 01. p. 351-369.

DUARTE, A. P. **Classificação Das Barragens De Contenção De Rejeitos De Mineração E De Resíduos Industriais No Estado De Minas Gerais Em Relação Ao Potencial De Risco**. Orientador: Terezinha de Jesus Espósito. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: < https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUDB-8AUPNJ/1/classifica_o_das_barragens_de_conten_o.pdf >. Acessado em: 18 out. 2022.

DRUMOND, B. **Beneficiamento mineral: o que é e quais são as suas etapas**. Engenharia adequada. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: < <https://adequada.eng.br/beneficiamento-mineral/> >. Acessado em: 30 dez. 2023.

FAITLI, J.; GOMBKÖTŐ, I. **Some technical aspects of the rheological properties of high concentration fine suspensions to avoid environmental disasters**. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 23:2, 129-137. 2015.

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Dam Breach Analysis – DRAFT**, 2014.

FERNANDES, R. B. **Inspeção, monitoramento e estabilidade de barragens**: Volume 2. - 1 ed. - Curitiba: Appris, 2022. 447 p. ISBN 978-65-250-2457-8.

FERNANDES, R. B. **Panorama geotécnico de ruptura de barragens e gestão de risco**. - 1 ed. - Curitiba: Appris, 2020. 405 p.

FITTON, T. G.; SEDDON, K. D. **Relating Atterberg limits to rheology**. In: R Jewell, AB Fourie & A Paterson (eds), Paste 2012: Proceedings of the 15th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2012. pp. 273-284. Disponível em: < https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1263_23_Fitton >. Acessado em: 10 abr. 2023

FREIRE, I. S. **Reologia escoamento e deformação da matéria**. Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico - CDT/UnB. 2012.

FREITAS, C. M.; SILVA, M. A. Acidentes de trabalho que se tornam desastres: os casos dos rompimentos em barragens de mineração no Brasil. **Revista brasileira de medicina do trabalho**, Brasil, ano 2019, p. 21-29, 2019. DOI 10.5327/Z1679443520190405. Disponível em: < <https://www.rbmt.org.br/details/416/pt-BR/acidentes-de-trabalho-que-se-tornam-desastres--os-casos-dos-rompimentos-em-barragens-de-mineracao-no-brasil> >. Acessado em: 10 fev. 2023.

FROEHLICH, D. C. Empirical model of embankment dam breaching. **River Flow - Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2016**, n. June 2016, p. 1821–1829, 2016.

GALINDO, Manuela Suellen Vieira. **Desenvolvimento de uma metodologia para determinação da viscosidade dos solos**. Orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em ENGENHARIA CIVIL) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: < https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/22977/22977_3.PDF >. Acessado em: 20 mar. 2023.

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

GITARI, W. M.; THOBAKGALE, R.; AKINYEMI, S. A. **Mobility and Attenuation Dynamics of Potentially Toxic Chemical Species at an Abandoned Copper Mine Tailings Dump**. *Minerals*. 2018; 8(2):64. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/min8020064> >. Acessado em: 23 mar. 2022.

HARTFORD, D. N. D. **Emerging principles and practices in dam risk management**. In: *Proceedings of The International Workshop on Risk Analysis in Dam Safety Assessment*, 1999, Taipei, Taiwan. Risk Analysis in dam safety assessment. Taiwan: Water Resources Publications, LLC, 1999. p. 1-34.

HEC - Hydrologic Engineering Center. 2023. US Army Corps of Engineers. Davis, USA: Institute for Water Resources. Disponível em: < <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/default.aspx> >. Acessado em: 08 abr. 2023.

HR Wallingford. **EMBREA**. Disponível em: < <https://www.dambreach.org/tools/embrea> >. Acesso em: 08 nov. 2022.

HR Wallingford. **Monitoramento inteligente de segurança de barragens – DAMSAT**. Disponível em: < <https://damsat.com/damsat-overview/> >. Acessado em: 08 nov. 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censos Demográficos | Memória IBGE**. Disponível em: < <https://memoria.ibge.gov.br/historia-do-ibge/historico-dos-censos/censos-demograficos.html#:~:text=Ao%20todo%2C%20o%20Censo%20de> >. Acessado em: 30 dez. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2016. 128 p. ISBN 978-85-61993-10-8.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. IBRAM. **Panorama da Mineração em Minas Gerais**. Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro de Metais. Brasília: IBRAM, 2015. 280 p. ISBN 978-85-61993-08-5.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. IGAM. **Dispões sobre a regulamentação dos artigos 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens**. Portaria IGAM nº 02, de 26 de fevereiro de 2019, Belo Horizonte, 26 fev. 2019.

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

KWONG, W. H. **Fenômenos de transportes: mecânica dos fluidos**. Coleção UAB-UFSCar. São Carlos: Ed. UFSCar, 2010. 153 p. ISBN 978-85-7600-201-7.

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

LUCENT TECHNOLOGIES. R 2019. 2019. Disponível em: < <https://www.rproject.org/> >. Acessado em: 03 jun. 2024.

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

MACHADO, L.V.T; AZEEZ, D. G. **Incidentes E Acidentes Em Barragens**. 7º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade - SIGABI, jun. 2018.

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

MAHMOOD, A. A.; ELEKTOROWICZ, M. **An investigation of the porosity dependent strength and leachability of mine tailings matrices containing heavy metals**. Cogent Environmental Science, 2020, 6:1, 1743626, DOI: 10.1080/23311843.2020.1743626.

MEIRELLES, F.S. **Panorama do Uso de TI no Brasil - 2022**. 26 mai. 2022. Disponível em: <<https://portal.fgv.br/artigos/panorama-uso-ti-brasil-2022>>. Acessado em: 31 dez. 2023.

MELO, M. S. L. F. **Sensibilidade a parâmetros reológicos na modelagem de fluxo hiperconcentrado proveniente de rupturas de barragens de rejeitos de mineração.** Orientador: Julian Cardoso Eleutério. 2022. 133 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2022.

METSO OUTOTEC. **Indústria de mineração no Brasil e seu crescimento.** Metso, 20 maio 2020. Disponível em: < <https://www.metso.com/pt/insights/blog/mineracao-e-metais/crescimento-da-mineracao-no-brasil/>>. Acessado em: 02 jul. 2024.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos.** 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2004. 572 p. ISBN 85-212-0343-8.

NORONHA, C. **Quadrilátero Ferrífero – províncias minerais do Brasil.** Igeológico. Março de 2020. Disponível em: <<https://igeologico.com.br/quadrilatero-ferrifero-uma-das-maiores-provincias-minerais-do-planeta/>>. Acessado em: 08 abr. 2023.

O'BRIEN, J. S., JULIEN, P.Y. **Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows in: Specialty Conference - Delineation of Landslide, Flash Flood and Debris Flow Hazards.** Utah State University. 1984. p. 260-279.

PORTO, R. DE M. **Hidráulica Básica.** 4ª ed. São Carlos: EESC, 2006. 540 p. ISBN 85-7656-084-4.

RAMAN, A.; LIU, F. **An investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC RAS simulation.** Preprint: arXiv:1911.05219 [physics.comp-ph], 2019. Disponível em: < <https://arxiv.org/pdf/1911.05219.pdf> >. Acessado em: 15 ago. 2022.

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

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

ROCHE, C.; THYGESSEN, K.; BAKER, E. **MINE TAILINGS STORAGE: SAFETY IS NO ACCIDENT.** ONU and GRID-Arendal; 13 nov. 2017. 70 p. ISBN: 978-82-7701-170-7.

RONCHI, G. **O Rompimento das Barragens.** Infografia. Janeiro de 2019. Disponível em: < http://2.bp.blogspot.com/-iBeX5rR_4Es/Vj5YImx7MbI/AAAAAAAAAH2M/qCWcSwY0VPo/s1600/info%2Bbarragem%2B2.jpg >. Acessado em: 15 fev. 2022.

RIOS, A. **Barragem na Chapada Diamantina é a mais perigosa na Bahia; entenda**. Jan, 2019. Disponível em: < <https://www.agmarrios.com.br/2019/01/barragem-na-chapada-diamantina-e-mais.html> >. Acessado em: 13 fev. 2022.

USACE (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS). **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. 2014. Davis: United States Army Corps of Engineers.

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

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

WANG, X.; WEI, Z.; LI, Q. **Experimental research on the rheological properties of tailings and its effect factors**. Environ Sci Pollut Res, 25, 35738–35747. 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3481-1> >. Acessado em: 12 fev. 2022.

WARBURTON, M.; HART, S.; LEDUR, J.; SCHEYDER, E.; LEVINE, A. J. **O risco iminente de barragens de rejeitos**. 2020. Disponível em: < <https://www.reuters.com/graphics/MINING-TAILINGS1/0100B4S72K1/index.html> >. Acessado em: 05 fev. 2023.

WISE URANIUM. **Chronology of major tailings dam failures**. 1998. Disponível em: < <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html> >. Acessado em: 12 fev. 2022.

WHITE, FRANK M. **Mecânica dos fluidos**. 8ª ed. Brasil: McGraw Hill, 2018. 864 p. ISBN 9788580556063.

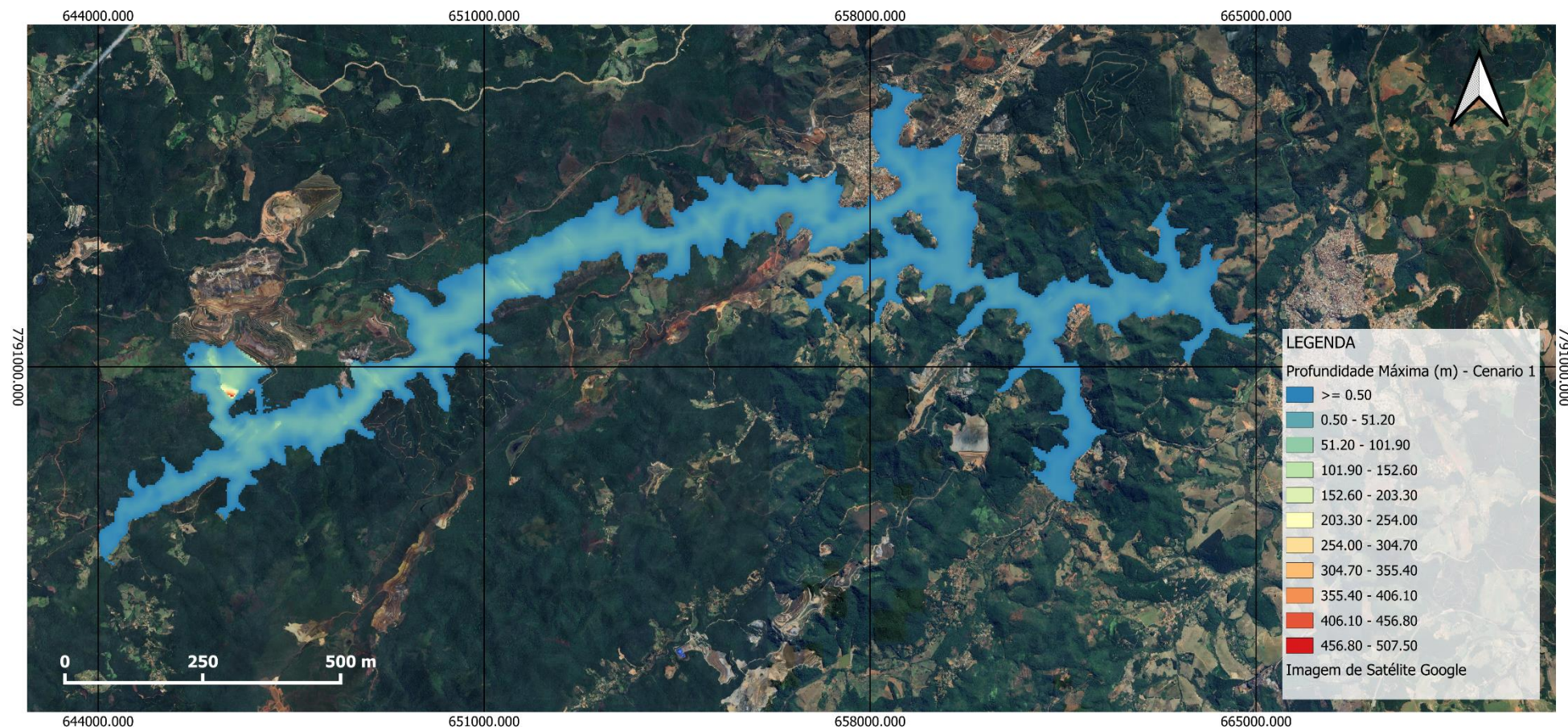
ZAPAROLLI, Domingos. **Demanda por minerais estratégicos impulsiona a indústria**. Valor Econômico, São Paulo, 29 ago. 2023. Disponível em: < <https://valor.globo.com> >. Acessado em: 01 jul. 2024.

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

ZHU, V. **Barragens: finalidade, tipos, riscos e a nova lei**. PET ENG CIVIL. UFPR. Out, 2020. Disponível em: < <http://petcivil.blogspot.com/2020/10/barragens-finalidade-tipos-riscos-e.html> >. Acessado em: 13 fev. 2022.

APÊNDICE I

Mapas de Profundidade Máxima



NOTAS

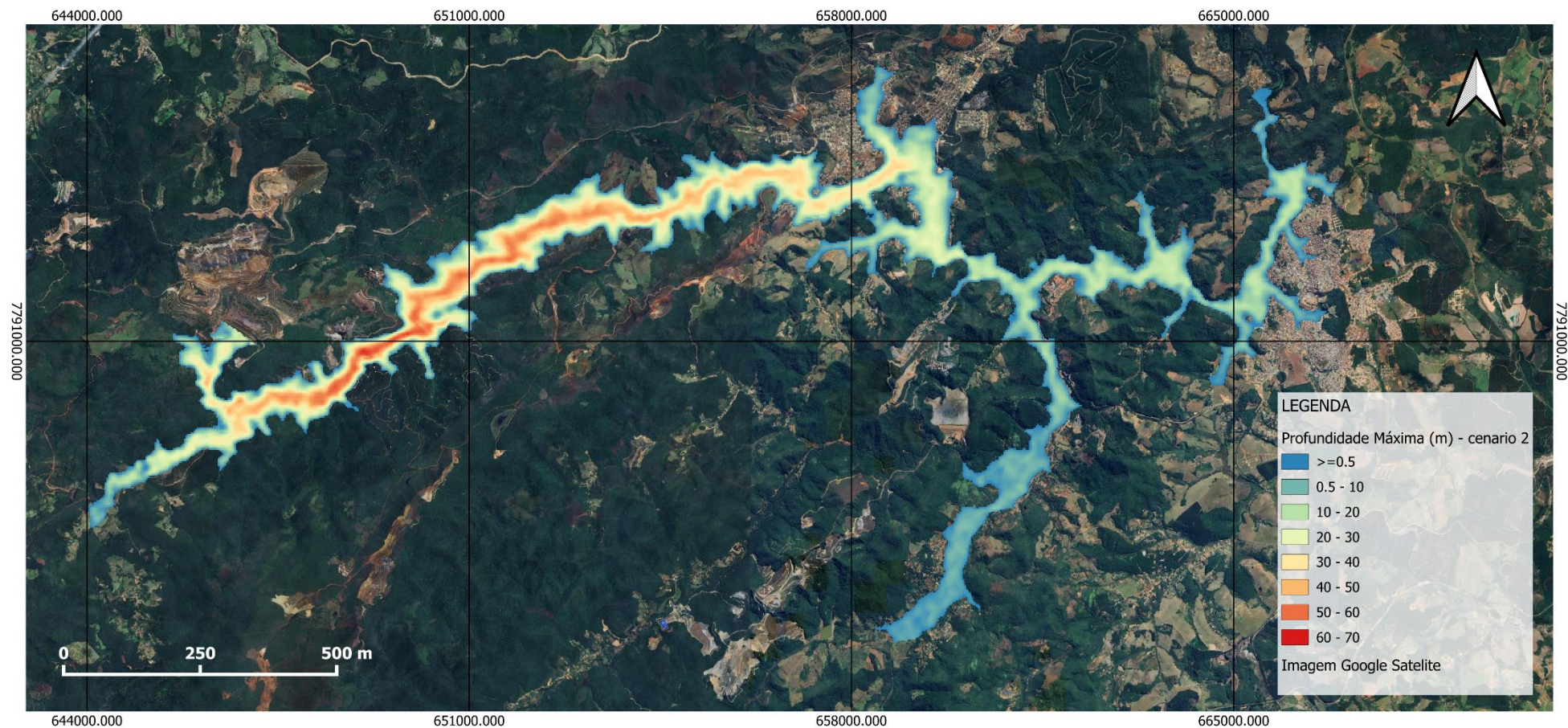
- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO
DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 1 - FLUIDO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING NORMAL MÉDIO (0.03)





NOTAS

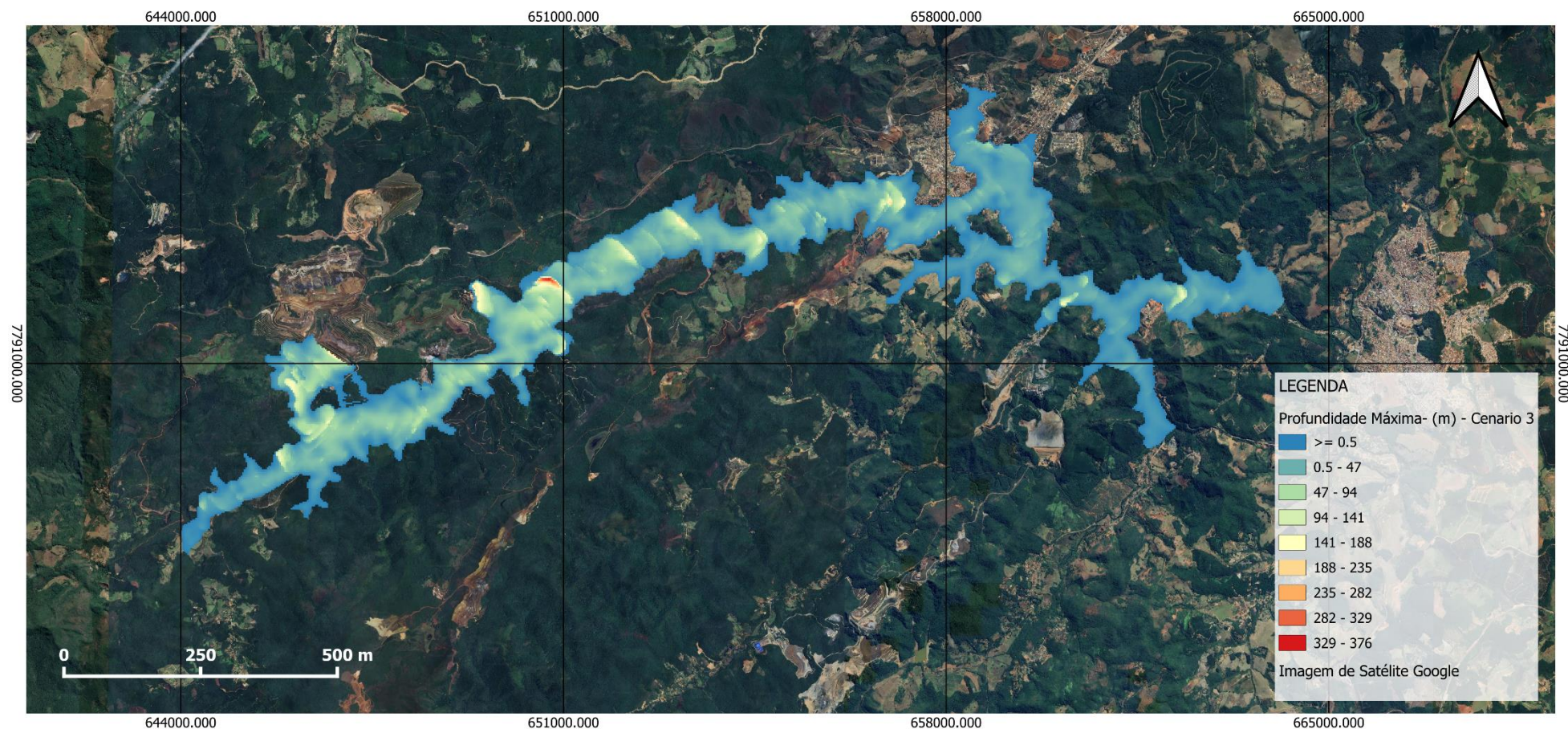
- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSION INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO
DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 2 - FLUIDO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING ALTO (0.3)





NOTAS

- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSIÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

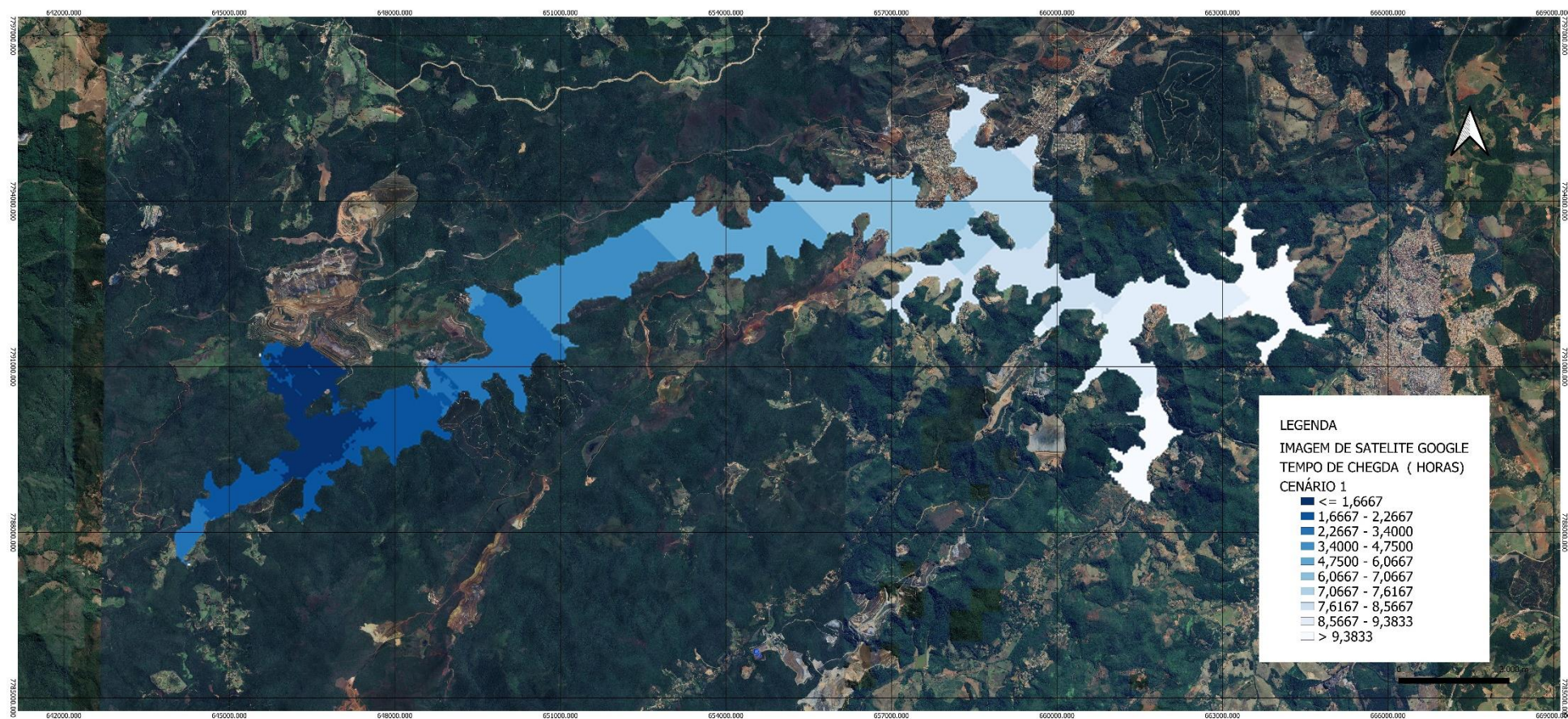
1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO
DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 3 - FLUIDO NÃO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING MÉDIO NORMAL (0.03)



APÊNDICE II**Mapas de Tempo de Chegada**



NOTAS

- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSIÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPTÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1- DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISE DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

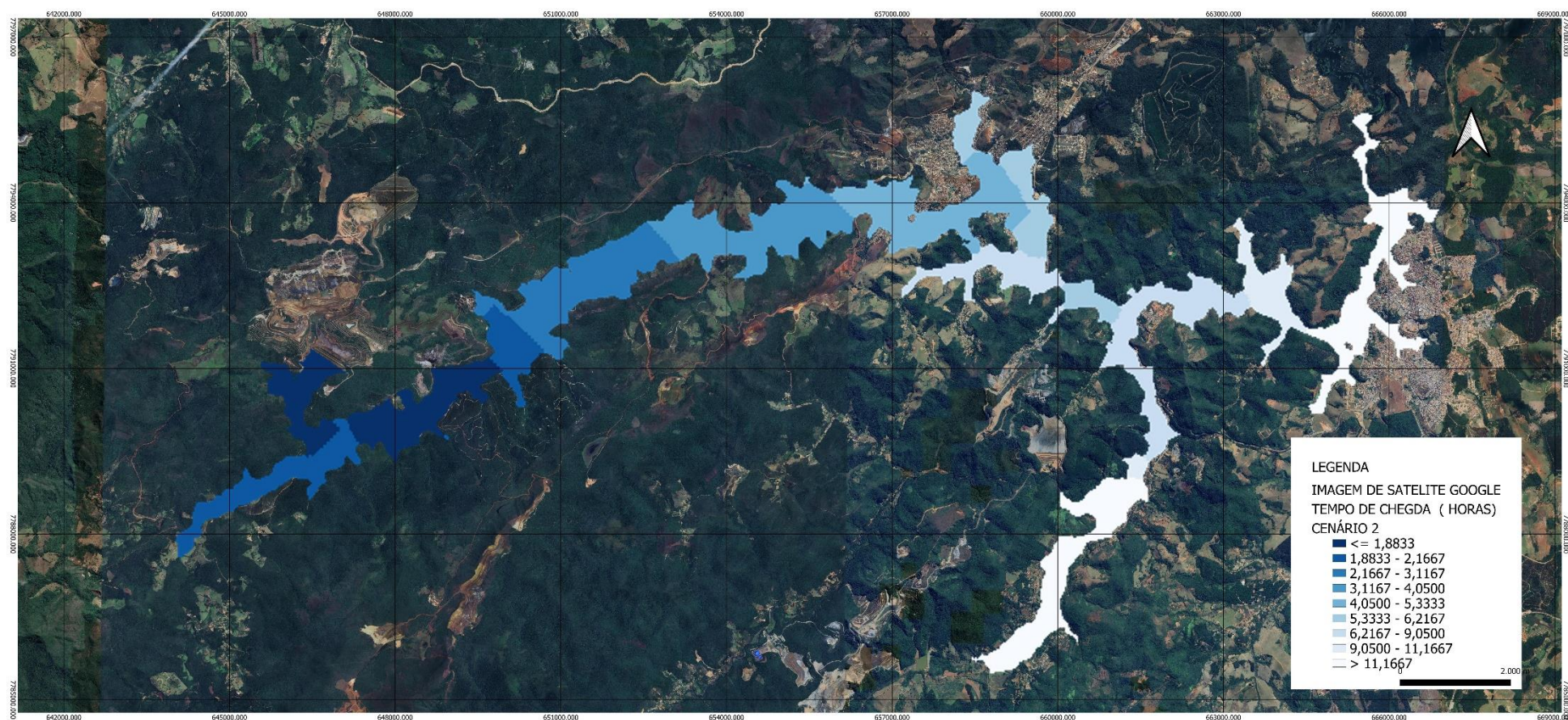
ESTUDO DE RUPTURA HIPÓTETICA

PÓS-GRADUAÇÃO

ALUNA: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO

CENÁRIO 01- Fluido newtoniano e coeficiente de manning normal médio (0.03)





NOTAS

- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSION INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1- DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

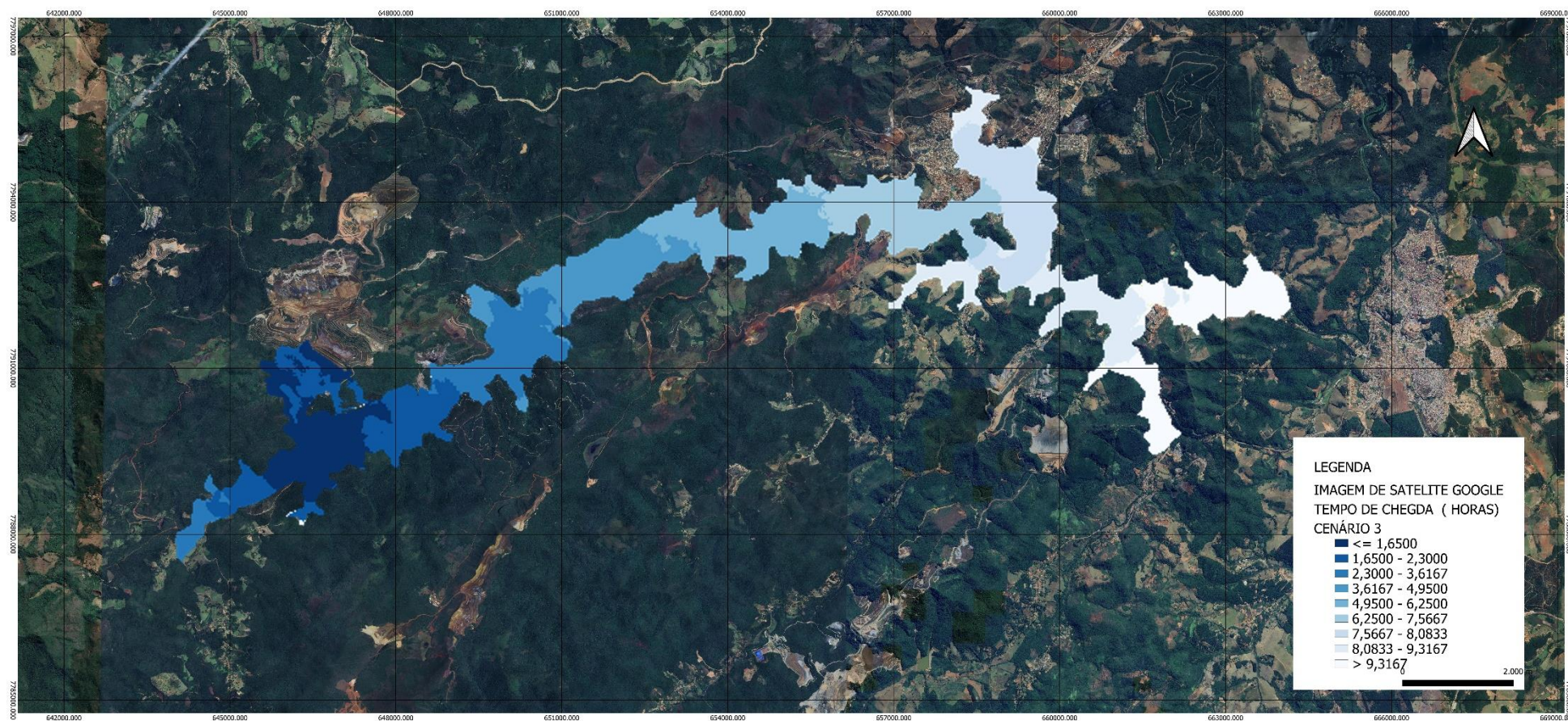
ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA

PÓS-GRADUAÇÃO

ALUNA: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO

CENÁRIO 02- Fluido newtoniano e coeficiente de manning alto (0.3)





NOTAS

- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSION INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1- DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPÓTETICA

PÓS-GRADUAÇÃO

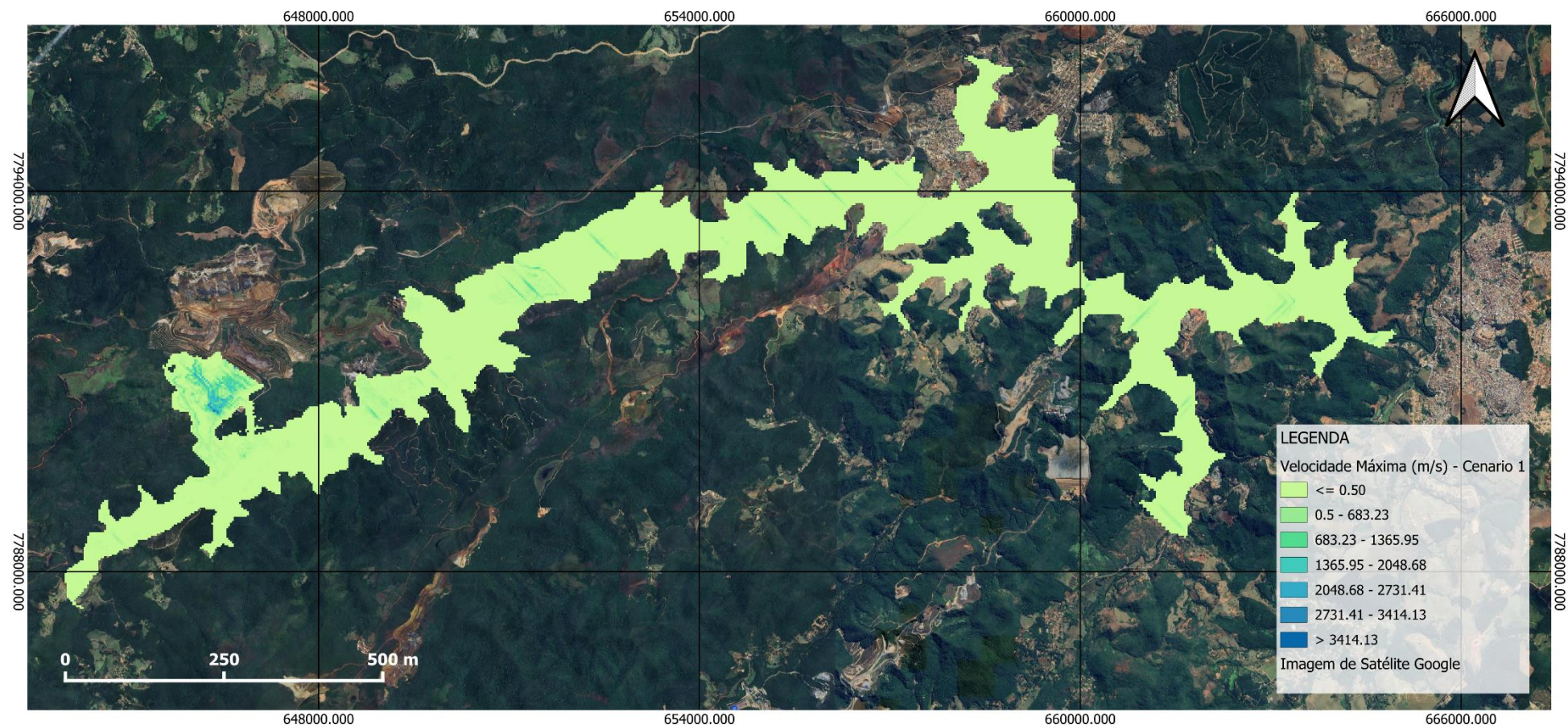
ALUNA: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO

CENÁRIO 03- Fluido não-newtoniano e coeficiente de manning normal médio (0.03)



APÊNDICE III

Mapas de Velocidade Máxima



NOTAS

- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSIÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

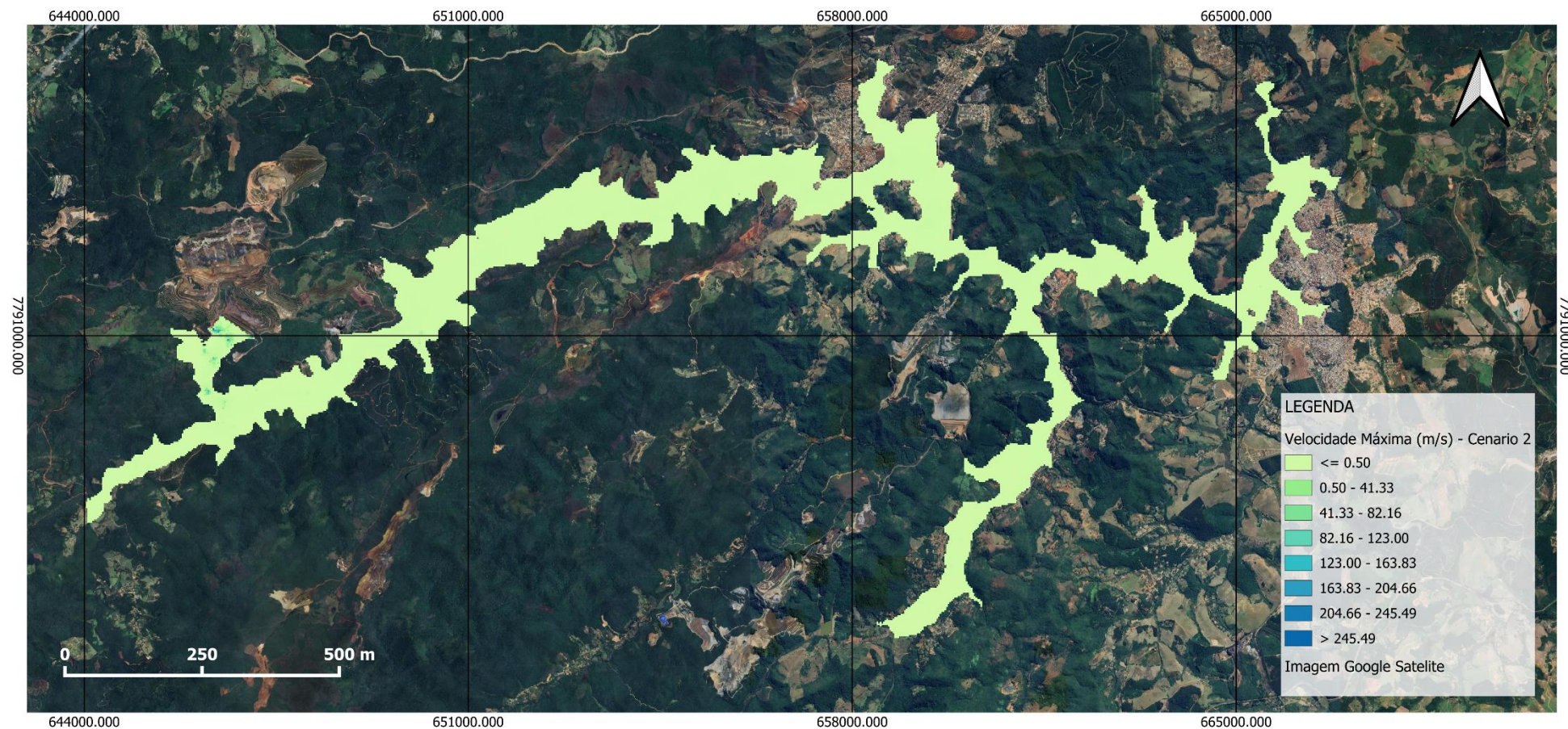
1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO

DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 1 - FLUIDO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING NORMAL MÉDIO (0.03)



**NOTAS**

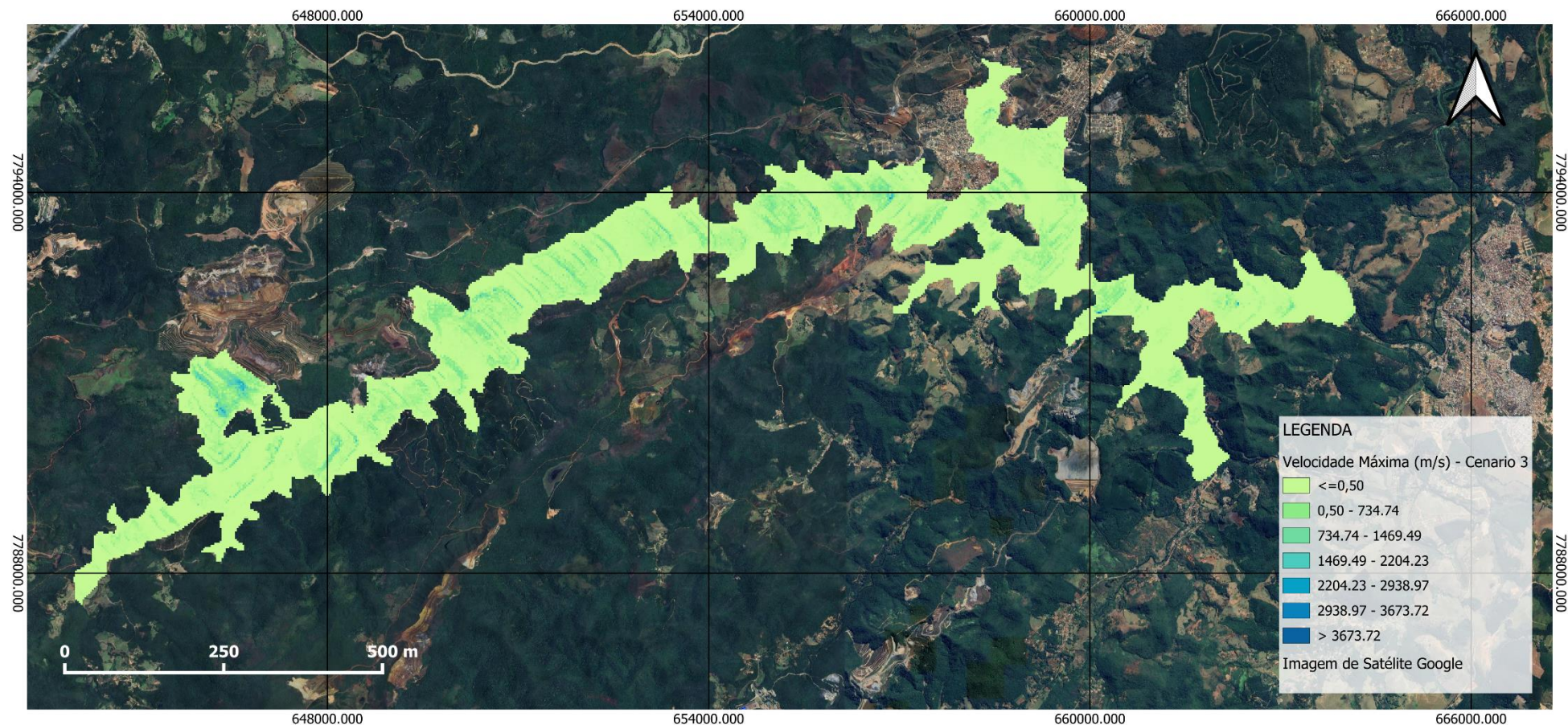
- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PRÓGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROÇÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO
DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 2 - FLUIDO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING ALTO (0.3)





NOTAS

- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSIÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍLBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

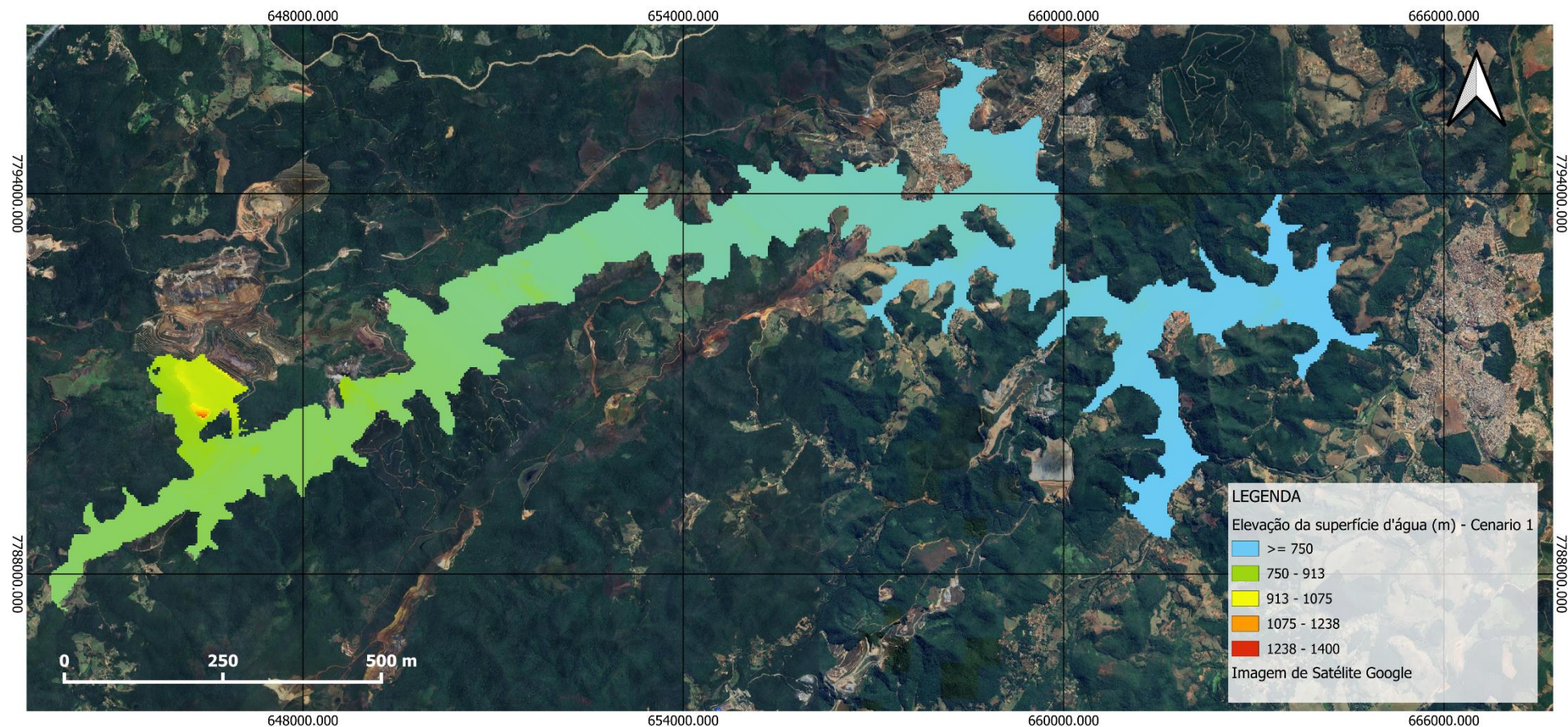
ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO
DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 3 - FLUIDO NÃO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING MÉDIO NORMAL (0.03)



APÊNDICE IV

Mapas de Elevação da superfície de água



NOTAS

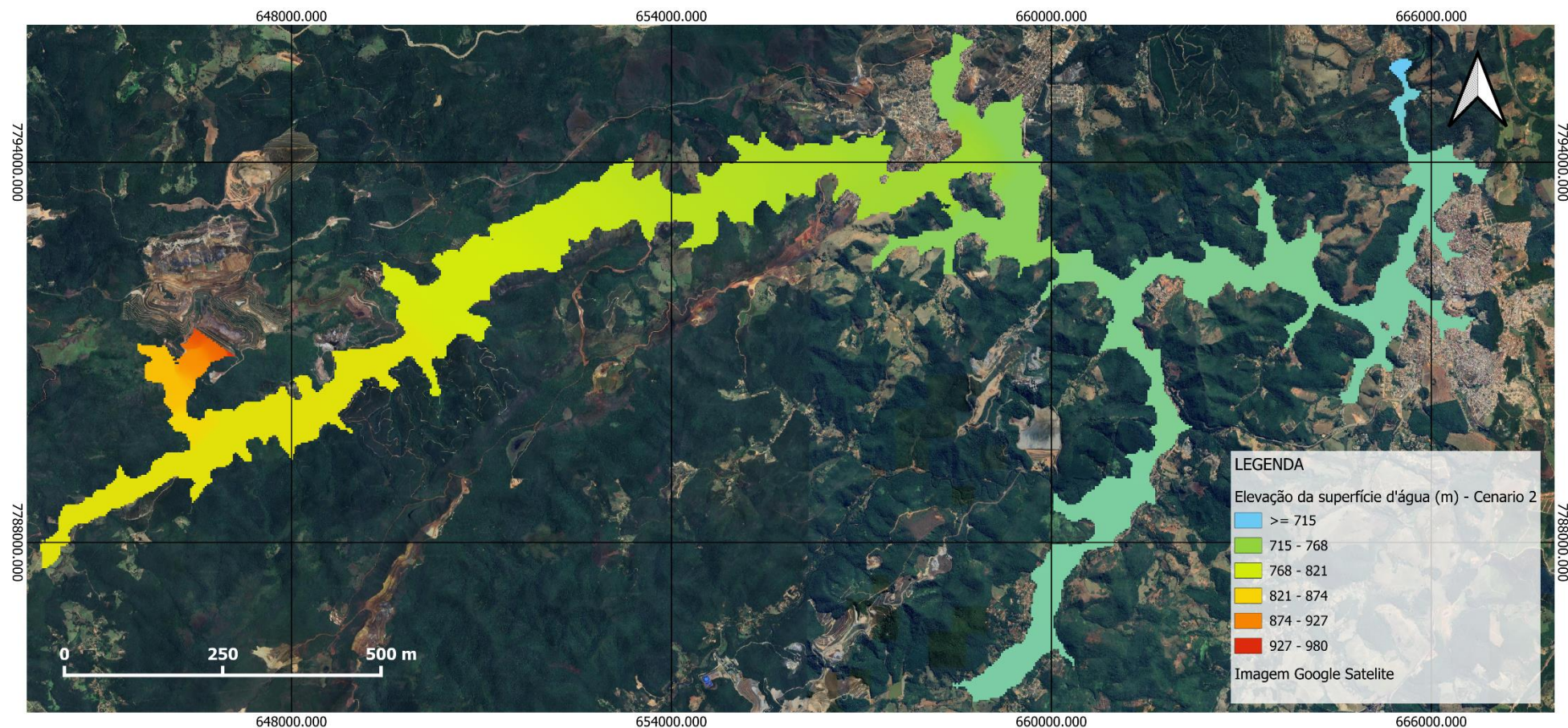
- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSIÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO
DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 1 - FLUIDO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING NORMAL MÉDIO (0.03)





NOTAS

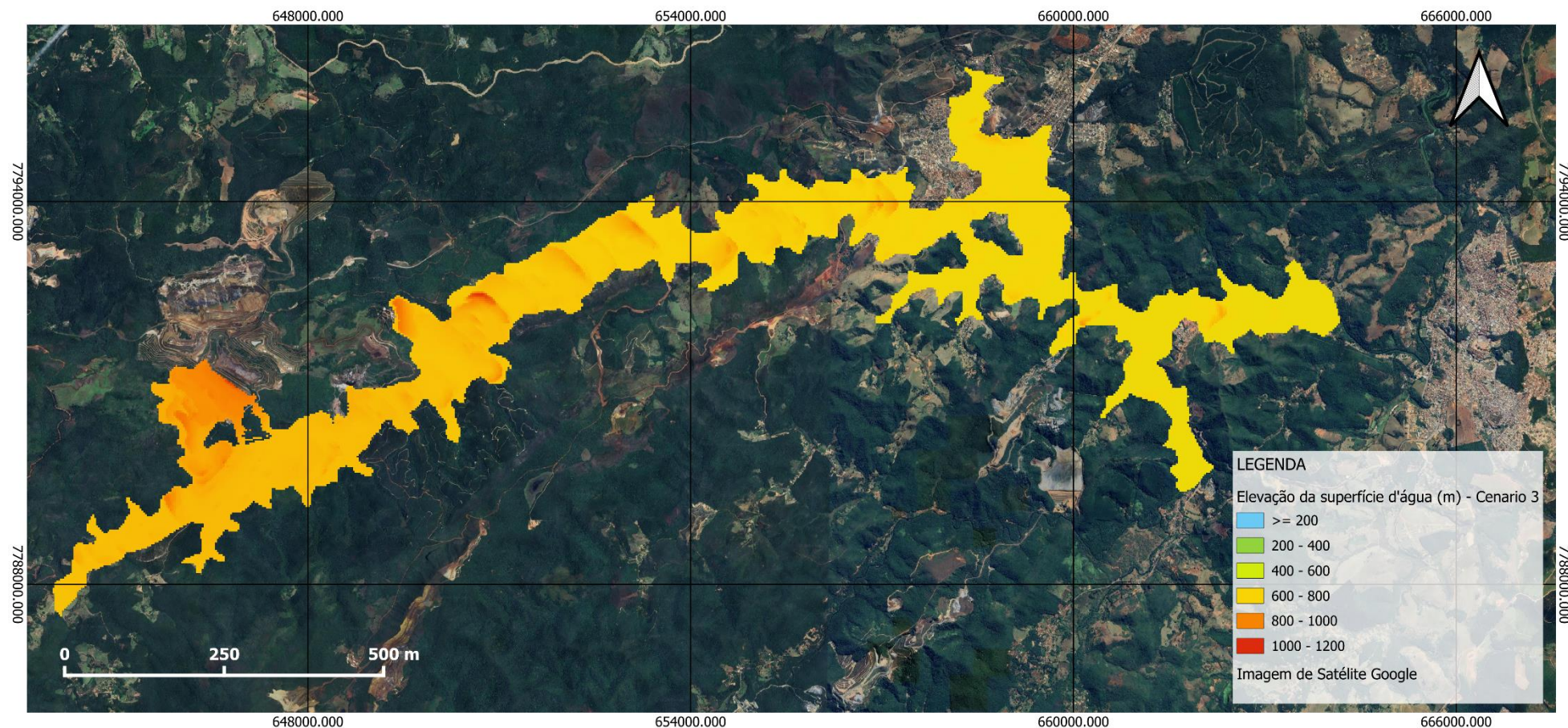
- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO
DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 2 - FLUIDO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING ALTO (0.3)





NOTAS

- 1 - ESTE MAPA APRESENTA UM PROGNÓSTICO DA INUNDAÇÃO POTENCIAL PARA CENÁRIO HIPOTÉTICO DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS LOCALIZADA EM MINAS GERAIS.
- 2 - O CENÁRIO SIMULADO REPRESENTA A PROPAGAÇÃO DA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA POR EROSIÃO INTERNA E PIPING DA REFERIDA ESTRUTURA.
- 3 - A INTERRUPÇÃO DA SIMULAÇÃO SE DEU QUANDO FOI IDENTIFICADO O EQUÍBRIO ENTRE O N.A. A JUSANTE E O N.A. DO RESERVATÓRIO.
- 4 - MANCHA DE INUNDAÇÃO DEFINIDA A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE TERRENO GERADO A PARTIR DO MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO DO USGS (US GEOLOGICAL SURVEY) FORNECIDO PELO RADAR SHUTTLE - SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION), PARA TODA A EXTENSÃO DO TRECHO SIMULADO.
- 5 - O MAPA DE INUNDAÇÃO APRESENTADO É BASEADO EM SIMULAÇÕES HIDRÁULICAS DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE RUPTURA, PELO VALE A JUSANTE DA ESTRUTURA EM QUESTÃO
- 6 - A MANCHA DE INUNDAÇÃO PODE SER DEFINIDA COMO A ESTIMATIVA DA ÁREA QUE SERIA COBERTA PELA ONDA RESULTANTE DA RUPTURA DA BARRAGEM. SUA PRECISÃO É DEPENDENTE DA QUALIDADE DAS INFORMAÇÕES DO TERRENO, DA SOFISTICAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E DA DISPONIBILIDADE DOS DADOS DE ENTRADA. ESSA INFORMAÇÃO DEVE SER UTILIZADA APENAS COMO UMA REFERÊNCIA E PODE VARIAR COM AS CONDIÇÕES EXISTENTES NA BARRAGEM E NO VALE A JUSANTE DURANTE O EVENTO DE RUPTURA.
- 7 - ESCALA NUMÉRICA PARA O FORMATO DE IMPRESSÃO ISO A3.

1 - DOCUMENTO REFERENCIA A DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTITULADA: MANCHA DE INUNDAÇÃO ASSOCIADA À RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS: ANÁLISES DO TIPO DE FLUIDO E DIFERENTES MODELOS HIDRODINÂMICOS

ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS

PÓS-GRADUAÇÃO
DISCENTE: KARINA SALATIEL DO NASCIMENTO
CENÁRIO 3 - FLUIDO NÃO NEWTONIANO E COEFICIENTE DE MANNING MÉDIO NORMAL (0.03)

