

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

Bruna Carolina de Melo Almeida

**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA RUPTURA DE BARRAGENS DE
REJEITO**

Belo Horizonte
2022

Bruna Carolina de Melo Almeida

AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO

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

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientador: Aloysio Portugal Maia Saliba

Coorientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui

Belo Horizonte
2022

A447a

Almeida, Bruna Carolina de Melo.

Avaliação do transporte de sedimentos na ruptura de barragens de rejeito [recurso eletrônico] / Bruna Carolina de Melo Almeida. – 2022.
1 recurso online (164 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Aloysio Portugal Maia Saliba.

Coorientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui.

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

Apêndices: f. 140-164.

Bibliografia: f. 131-139.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Teses.
3. Barragens e açudes - Ruptura - Teses. 4. Mineração - Teses.
5. Barragens de rejeitos - Teses. 6. Sedimentos (Geologia) - Teses.
I. Saliba, Aloysio Portugal Maia. II. Tarqui, Jorge Luis Zegarra.
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
IV. Título.

CDU: 628(043)



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação do Transporte de Sedimentos Na Ruptura de Barragens de Rejeito"

BRUNA CAROLINA DE MELO ALMEIDA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba

Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui

Prof. Geraldo de Freitas Maciel

Prof. Rafael Manica

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 05 de setembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo de Freitas Maciel, Usuário Externo**, em 02/09/2022, às 22:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aloysio Portugal Maia Saliba, Professor do Magistério Superior**, em 08/09/2022, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Manica, Usuário Externo**, em 14/09/2022, às 09:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Zegarra Tarqui, Membro**, em 14/09/2022, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 27/03/2023, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1731725** e o código CRC **37156C1D**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por cada oportunidade concedida ao longo do caminho e pela saúde e força para lutar pelos meus objetivos.

Agradeço, de forma especial, aos meus pais e irmãos pelo amor e pelo apoio incondicional em todos os momentos. Obrigada por sempre acreditarem em mim e me estimularem a ser uma pessoa melhor cada dia. A vocês, todo o meu amor.

Ao João e à sua família, pelo acolhimento e cuidado em todos os momentos, mesmo os mais difíceis. Todo o suporte e carinho que me deram foi fundamental para que eu pudesse me dedicar a esse trabalho.

Ao meu orientador Aloysio Saliba, meus mais sinceros agradecimentos por todo entusiasmo e dedicação à realização deste trabalho. Obrigada por sempre se mostrar disponível e empenhado em todos os momentos e por ter abraçado a ideia desse trabalho. Ao meu coorientador Jorge Tarqui agradeço todo o apoio e disponibilidade para o desenvolvimento deste trabalho. Minha gratidão ainda aos meus professores do Departamento de Recursos Hídricos da UFMG (SMARH) pelos enormes aprendizados e oportunidades de desenvolvimento na área.

A todos os colegas de profissão, agradeço a paciência e os ensinamentos diários, que vão muito além do técnico. Aos amigos e mestres que tive nessa caminhada, gostaria de agradecer especialmente a Milena, Ana Clara, Fernanda, Lucas, Hélivio, Flávia, Geovane, Luane e Rubens por toda a paciência e disponibilidade de sempre transmitirem o conhecimento. Vocês são para mim uma inspiração!

Aos meus amigos de mestrado, que me apoiaram em todo desenvolvimento desse trabalho, sou muito grata por ter tido vocês para partilharem dessa caminhada comigo. Em especial a Vitória, a Malena, o Rodrigo, a Carol e ao Alan o meu muito obrigada!.

Agradeço à Samarco Mineração pela disponibilização dos dados, bem como à Nathália Machado, Juni Cordeiro e André Silva pelo fornecimento de informações adicionais e pelo apoio para que fosse possível a concretização desse estudo.

A todos aqueles que de alguma forma me ajudaram para a realização desse trabalho.

RESUMO

A mineração é uma das principais atividades econômicas do Brasil. Como produto de toda atividade de mineração encontram-se os rejeitos, que são materiais sem valor econômico significativo agregado e cuja disposição, realizada na maioria das vezes em barragens, deve ser pautada em soluções que combinem a minimização dos impactos ambientais associados ao menor custo para sua contenção e segurança. A ocorrência da ruptura de barragens de rejeitos é um evento catastrófico, que acarreta vários danos ambientais e sociais, como foi o caso da ruptura da Barragem de Fundão, localizada no Município de Mariana, em Minas Gerais. A ruptura ocorreu no dia 05 de novembro de 2015, culminando em cerca de 32 milhões de m³ de rejeitos propagados pelo vale a jusante, que ocasionaram a destruição de Bento Rodrigues e danos ambientais que se estenderam até a foz do Rio Doce no mar, em Regência (ES). Um dos instrumentos que possibilitam a avaliação prévia dos possíveis impactos resultantes de uma ruptura de barragem são os estudos de Ruptura Hipotética *ou Dam Break*, cujo objetivo é a realização de uma modelagem hidrodinâmica da inundação potencial associada ao eventual rompimento de determinada estrutura. Um dos aspectos relacionados aos estudos de Ruptura Hipotética que comumente não são considerados são relativos ao transporte de sedimentos ocasionados pela ruptura, em função da complexidade de estabelecimento de um equacionamento representativo do fenômeno. No presente estudo buscou-se avaliar o impacto da consideração desse aspecto nos estudos de Ruptura Hipotética de uma barragem de rejeitos, utilizando-se como estudo de caso a Barragem de Fundão. A metodologia do trabalho se pautou essencialmente na construção de um modelo hidrodinâmico bidimensional no HEC-RAS para o estudo de ruptura hipotética da barragem, em dois cenários distintos: com e sem a consideração do transporte de sedimentos. A partir da análise da inundação propagada ao longo do vale a jusante, com avaliação de alteração em parâmetros como velocidade, profundidade máxima e tempo de chegada da onda, bem como a comparação dos mapas de inundação gerados, foi possível quantificar diferenças na incorporação do transporte de sedimentos na simulação de rupturas de barragens. Os resultados mostram-se satisfatórios a partir da utilização desta ferramenta e indicam que nos primeiros quilômetros a jusante da estrutura, região corresponde à Zona de Autossalvamento (ZAS), a consideração ou não da inserção do transporte de sedimentos não resulta em diferenças significativas nos parâmetros avaliados.

Palavras-chave: Transporte de sedimentos. *Dam Break*. HEC-RAS. Barragem de Fundão.

ABSTRACT

Mining is one of the main economic sources in Brazil. Tailings are found as a by-product of all mining activities, and those materials carry no significant added economic value. Its disposal, most often carried out in dams, must be based on solutions that combine the minimization of environmental impacts associated with the lowest cost for its containment and security. The occurrence of the rupture of tailings dams is a catastrophic event, which causes several environmental and social damages, as it was the case of the rupture of the “Fundão” Dam, located in the Municipality of Mariana, in Minas Gerais, Brazil. This rupture occurred on November 5, 2015, leading to a propagation of about 32 million m³ of tailings through the downstream valley, causing the destruction of Bento Rodrigues and environmental damage that extended to the river mouth of the “Rio Doce” into the sea, in Regência (ES). One of the instruments that make it possible in advance to assess the possible impacts resulting from a dam failure are the Dam Break studies. Their aim is to carry out a hydrodynamic modeling of a potential flood associated with the eventual rupture of a given structure. One of the aspects related to Dam Break studies that are commonly not considered is related to the transport of sediments caused by the rupture, due to the complexity of establishing a representative equation for the phenomenon. In this present study, it was sought to evaluate the impact of considering this aspect in studies of Dam Break of a tailings dam, using the “Fundão” Dam as a case study. The work methodology was essentially based on the construction of a two-dimensional hydrodynamic model in the HEC-RAS for the study of a hypothetical rupture of the dam, in two different scenarios: with and without considering the transport of sediments. From the analysis of the flood spread along the downstream valley, together with the evaluation of changes in parameters such as speed, maximum depth and wave arrival time, as well as the comparison of the generated flood maps, it was possible to quantify differences in the incorporation of transport of sediments in the simulation of dam ruptures. The use of this tool demonstrates satisfactory results and indicate that the region corresponds to the “Self-Rescue Zone” (ZAS) in the first kilometers downstream from the structure. The consideration or not of the insertion of sediment transport does not result in significant differences in the evaluated parameters.

Keywords: Sediment transport. Dam Break. HEC-RAS. “Fundão” Dam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição de Diferentes Usos de Barragens no Território Brasileiro.....	20
Figura 2 – Incidentes em Barragens de Rejeito	24
Figura 3 – Distribuição do Número de Incidentes por Causa no Mundo	25
Figura 4 – Distribuição da porcentagem de causas de falha de barragens de terra .	25
Figura 5 – Distribuição da porcentagem de deficiência técnicas para a causa de falha de barragens de terra	26
Figura 6 – Rejeito na forma de Polpa (a), Pasta (b) e Torta (c).....	28
Figura 7 - Seções Típicas – Métodos de Alçamento de Barragens	30
Figura 8 – Resistência ao escoamento versus concentração em suspensão de rejeitos	32
Figura 9 – Resistência ao escoamento versus concentração em suspensão de rejeitos	33
Figura 10 – Relacionamento entre os fatores que contribuem para estabelecer um equilíbrio estável em um canal fluvial, conforme equação de Lane	36
Figura 11 – Produção de Sedimentos em uma Bacia Hidrográfica	38
Figura 12 – Distribuição verticais que podem ser encontradas em corpos hídricos..	41
Figura 13 – Diagrama da distribuição da velocidade, concentração de sedimentos e descarga sólida nos corpos hídricos	42
Figura 14 – Diagrama Hjulström.mostrando a velocidade média do fluxo na qual partículas de um determinado tamanho são arrastadas, transportadas e depositadas	45
Figura 15 - Diagrama de Shields para Material Granular	46
Figura 16 - Ábaco para cálculo da descarga sólida total pelo método de Colby simplificado – obtenção da descarga sólida não-medida aproximada, por metro de largura do curso hídrico, a partir da velocidade média do curso d'água	51
Figura 17 - Ábaco 2 para cálculo da descarga sólida total pelo método de Colby simplificado – obtenção da concentração relativa a partir da velocidade média e da profundidade média do curso d'água	52
Figura 18 - Ábaco 3 para cálculo da descarga sólida total pelo método simplificado de Colby – obtenção do fator de correção a partir da razão de eficiência.....	53
Figura 19 – Direções das células da grade: a) ortogonal, b) não ortogonal	62
Figura 20 – Localização da Barragem de Fundão – Aspectos Gerais do Entorno	67

Figura 21 – Croqui esquemático do corte da Barragem do Fundão.....	68
Figura 22 – Arranjo Geral da Barragem do Fundão com crista na El. 920,00 m.....	69
Figura 23 – Curva Cota-Volume Fundão (DCLs + ERA).....	70
Figura 24 – Curva granulométrica dos materiais depositados na barragem do Fundão	71
Figura 25 – Fluxograma das Etapas Metodológicas Propostas	72
Figura 26 – Hidrograma afluente (referente ao hidrograma de ruptura da Barragem do	77
Figura 27 - Composição do hidrograma de ruptura, com especificação dos volumes de água e sólidos	77
Figura 28 - Exemplo do efeito da vegetação e do nível de água, ao compor rasters de diferentes resoluções	79
Figura 29 – Modelo Digital de Terreno (MDT) a ser utilizado na simulação hidráulica – Dado pré e pós ruptura	81
Figura 30 – Pontos de coleta das amostras para realização de ensaios de caracterização do rejeito	83
Figura 31 – Curva Granulométrica dos Pontos 1, 2 e 3 coletados em comparação com	83
Figura 32 – Composição das curvas exponenciais de viscosidade para as amostras dos	84
Figura 33 – Composição das curvas exponenciais de tensão de escoamento, para as	85
Figura 34 – Malha Computacional 2D.....	87
Figura 35 – Uso e ocupação do solo adotada na região de estudo	88
Figura 36 – Composição da carga de sedimentos resultantes da ruptura da Barragem de Fundão no tempo, em toneladas.....	95
Figura 37 – Seções transversais de referência para a avaliação e comparação dos resultados das simulações hidráulicas	97
Figura 38 – Mancha de inundação resultante – Avaliação do rompimento da Barragem de Fundão – Comparação entre os cenários avaliados	99
Figura 39 – Resultados de profundidades máximas (m) no escoamento ao longo das seções de interesse	99
Figura 40 – Resultados de profundidades máximas (m) no escoamento ao longo das seções de interesse	100

Figura 41 – Máximas profundidades de escoamento – Cenário 1	101
Figura 42 – Máximas profundidades de escoamento – Cenário 2	101
Figura 43 – Máximas profundidades de escoamento – Cenário 3	102
Figura 44 – Avaliação da variação de velocidade (m/s) ao longo das seções de interesse.....	102
Figura 45 – Máximas velocidades de escoamento – Cenário 1	103
Figura 46 – Máximas velocidades de escoamento – Cenário 2	103
Figura 47 – Máximas velocidades de escoamento – Cenário 3	104
Figura 48 – Resultados de tempo de chegada (horas) para as profundidades máximas no escoamento ao longo das seções de interesse.....	104
Figura 49 – Tempo de chegada da onda – Cenário 1	106
Figura 50 – Tempo de chegada da onda – Cenário 2	106
Figura 51 – Tempo de chegada da onda – Cenário 3	107
Figura 52 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 1	108
Figura 53 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 2	109
Figura 54 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 3	109
Figura 55 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 4	110
Figura 56 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 5	110
Figura 57 – Resultados de vazões máximas (m ³ /s) atingidas no escoamento ao longo das seções de interesse.....	111
Figura 58 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 00 (ST-00) – Cenário 3	112
Figura 59 – Combinação e classificação binária – Simulação Cenário 3 – Fluido aquoso com inserção dos parâmetros de transporte de sedimentos	114
Figura 60 – Resultados do viés e fatores de desempenho F ² , F ³ e F ⁴	115
Figura 61 – Mancha de inundação resultante – Avaliação do rompimento da Barragem de Fundão – Comparação entre os cenários avaliados	117
Figura 62 - Resultados de profundidades máximas (m) no escoamento ao longo das seções de interesse	118

Figura 63 – Avaliação da variação de elevação (m) ao longo das seções de interesse	118
Figura 64 - Máximas profundidades de escoamento – Cenário 3	119
Figura 65 – Avaliação da variação de velocidade (m/s) ao longo das seções de interesse.....	120
Figura 66 – Máximas velocidades de escoamento – Cenário 3	120
Figura 67 – Resultados de tempo de chegada (horas) para as profundidades máximas no escoamento ao longo das seções de interesse.....	121
Figura 68 – Tempo de chegada da onda – Cenário 3.....	121
Figura 69 – Variação percentual entre as vazões de pico – Cenários 1 a 5	122
Figura 70 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 1	122
Figura 71 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 2	123
Figura 72 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 3	123
Figura 73 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 4	124
Figura 74 – Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 5	124
Figura 75 – Resultados de vazões máximas (m ³ /s) atingidas no escoamento ao longo das seções de interesse.....	125
Figura 76 - Resultados do viés e fatores de desempenho F ² , F ³ e F ⁴	126
Figura 77 – Máximas profundidades de escoamento – Cenário 4	141
Figura 78 – Máximas profundidades de escoamento – Cenário 5	141
Figura 79 – Máximas velocidades de escoamento – Cenário 4	142
Figura 80 – Máximas velocidades de escoamento – Cenário 5	142
Figura 81 – Tempo de chegada da onda – Cenário 4.....	143
Figura 82 – Tempo de chegada da onda – Cenário 5.....	143
Figura 83 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 01 (ST-01).....	151
Figura 84 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 02 (ST-02).....	151
Figura 85 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 03 (ST-03).....	152
Figura 86 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 04 (ST-04).....	152
Figura 87 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 05 (ST-05).....	153

Figura 88 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 06 (ST-06).....	153
Figura 89 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 07 (ST-07).....	154
Figura 90 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 08 (ST-08).....	154
Figura 91 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 09 (ST-09).....	155
Figura 92 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 10 (ST-10).....	155
Figura 93 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 11 (ST-11).....	156
Figura 94 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 12 (ST-12).....	156
Figura 95 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 13 (ST-13).....	157
Figura 96 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 14 (ST-14).....	157
Figura 97 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 15 (ST-15).....	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Casos de Ruptura de Barragens no Brasil na Última Década	23
Tabela 2 – Causas e sub-causas do rompimento de barragens	26
Tabela 3 – Classificação dos sedimentos conforme faixas granulométricas.....	39
Tabela 4 – Classificação dos sedimentos conforme faixas granulométricas.....	39
Tabela 5 – Equações para a determinação do transporte de carga no leito	49
Tabela 6 – Caracterização do escoamento em função da concentração de sólidos .	60
Tabela 7 – Conjuntos de possibilidades – Combinações para a utilização da comparação binária.....	64
Tabela 8 – Indicadores de desempenho binários para utilização em estudos de inundação.....	65
Tabela 9 – Volume e tempo de enchimento dos reservatórios– Barragem de Fundão	69
Tabela 10 – Estimativas de Volume Propagado.....	75
Tabela 11 – Cenários avaliados	85
Tabela 12 – Equações de referência – HEC-RAS.....	90
Tabela 13 – Equações de referência – Velocidade de queda – HEC-RAS	92
Tabela 14 – Classificação granulométrica – Composição da carga de sedimentos resultantes da ruptura da Barragem de Fundão.....	95
Tabela 15 – Distância das seções transversais analisadas	97
Tabela 16 – Zonas de depósito – Valores máximos de deposição (m) ao longo das seções transversais.....	113
Tabela 17 – Índices de desempenho – Descrição dos valores	114
Tabela 18 – Comparativo entre configurações computações	116
Tabela 19 – Cenários avaliados	117
Tabela 20 – Comparativo entre as simulações realizadas com SWE ou DW	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA - Agência Nacional das Águas

ANM - Agência Nacional de Mineração

Cv - Concentrações Volumétricas (%)

DCL - Diques de Contenção de Lamas

DOU - Diário Oficial da União

ERA - Empilhamento de Rejeitos Arenosos

HEC - *Hydrologic Engineering Center*

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDT - Modelo Digital de Terreno

PAE - Plano de Ação de Emergência

PAEBM - Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

RSB - Relatório de Segurança de Barragens

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

USACE - *U.S. Army Corps of Engineers*

ZAS - Zona de Autossalvamento

ZSS - Zona de Segurança Secundária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1	Aspectos Gerais sobre as Barragens no Brasil	20
3.2	Aspectos Gerais sobre a Ruptura de Barragens	23
3.3	Aspectos Gerais sobre a Ruptura de Barragens	27
3.3.1	Disposição dos Rejeitos	28
3.3.2	Reologia dos Rejeitos	31
3.4	Transporte de Sedimentos	34
3.4.1	Geomorfologia Fluvial	36
3.4.2	Características do leito fluvial e distribuição de sedimentos	38
3.4.3	Modos de Transporte de Sedimentos	42
3.4.4	Quantificação do Transporte de Sedimentos	47
3.4.5	Transporte de Sedimentos nos Estudos de Ruptura Hipotética	54
3.5	Abordagens Hidráulicas	57
3.5.1	HEC-RAS	60
3.5.2	Avaliação dos Modelos Hidráulicos	64
4	A BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE FUNDÃO	66
5	METODOLOGIA	72
5.1	Etapa 1 – Dados e Parâmetros de Entrada	74
5.1.1	Hidrograma de Ruptura	74
5.1.2	Base Topográfica	78
5.1.3	Caracterização Geotécnica, Reológica e Sedimentológica dos Rejeitos ..	82
5.2	Etapa 2 – Modelagem Hidráulica	85
5.2.1	Cenários Avaliados	85
5.2.2	Propagação da Onda de Cheia pelo Vale a Jusante	86
5.2.3	Fluido Hiperconcentrado	89
5.2.4	Transporte de Sedimentos	89
5.3	Etapa 3 – Mapas de Inundação	96
5.4	Etapa 4 – Análise dos Resultados	96
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
6.1	Resultados da Modelagem Hidráulica	98
6.2	Avaliação das Zonas de Depósito	111

6.3	Avaliação de Desempenho da Simulação Hidráulica	113
6.4	Avaliação da Demanda Computacional	115
7	CONCLUSÕES	128
	REFERÊNCIAS	131
	APÊNDICE A – Mapas Temáticos	140
	APÊNDICE B – Mapas de Inundações	144
	APÊNDICE C – Zonas de Depósito	150
	APÊNDICE D – Mapas de Inundações	159

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma das principais atividades econômicas do Brasil. Segundo dados do IBRAM (2020), no ano de 2019 a produção mineral representou cerca de 16,8% do PIB Industrial do país. Conforme citado por Albuquerque Filho (2004), qualquer atividade, de cunho agrícola ou industrial, perpassando os campos de metalurgia, indústria química, construção civil ou cultivo da terra, utilizarão necessariamente os minerais lavrados e seus respectivos produtos derivados. Em face desse panorama, somado ao contínuo aumento da população mundial, Albuquerque Filho (2004) salienta o quanto torna-se cada vez mais importante o aumento da produção para atender à crescente demanda.

Como produto de toda atividade de mineração destacam-se os rejeitos que, conforme citado por Machado (2017), além de não possuírem um valor econômico significativo agregado, representam uma constante preocupação para as empresas no momento de realizar a sua disposição. As empresas procuram por soluções que combinem os seguintes fatores: minimização dos impactos ambientais associados ao menor custo para sua contenção e segurança (MACHADO, 2017).

Recentemente a ocorrência de dois acidentes de grandes proporções, Barragem de Fundão (em 2015) e da Barragem B-I, em Brumadinho (em 2019), ambos no estado de Minas Gerais, colocaram em evidência a problemática relacionada ao rompimento de barragens de rejeitos. Trata-se de um evento catastrófico, que acarreta incontáveis danos ambientais, além de uma perda inestimável de vidas humanas, em alguns casos de ruptura.

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água, para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Com a ocorrência do rompimento da Barragem B-I, em Brumadinho (MG), foram propostas alterações na PNSB e foi aprovada a Lei nº 14.066, em 30 de setembro de 2020. Conforme destacado por Silva *et al.* (2020), entre as principais mudanças encontram-se a inserção de um capítulo específico para as infrações e sanções que os proprietários cujas barragens sofrerem rompimentos estarão sujeitos.

Os dispositivos legais no âmbito de ruptura de barragens de rejeitos, que se encontram estabelecidos na legislação de referência, conforme destacado anteriormente, estão cada vez mais estruturadas e atentos aos impactos resultantes de uma eventual ruptura e, de acordo com Silva *et al.* (2020), o grande desafio da atualidade está relacionado com conferir o máximo de efetividade para a Política Nacional de Segurança de Barragens.

Dado esse contexto, destaca-se que uma importante ferramenta que possibilita a avaliação prévia de possíveis impactos associados a ruptura de barragens e é um dos principais subsídios na elaboração de Planos de Ação de Emergência (PAE) são os estudos de Ruptura Hipotética ou *Dam Break*. Tais estudos tem como objetivo a realização de uma modelagem hidrodinâmica da inundação potencial associada a ruptura hipotética de determinada estrutura. Os estudos de *Dam Break* permitem, através das modelagens realizadas, a delimitação de potenciais áreas atingidas a jusante. As modelagens estão em constante evolução e buscam se aproximar cada vez mais da condição real através de refinamento dos dados utilizados, bem como a evolução computacional dos *softwares* de referência.

Um dos aspectos relacionados a ruptura de uma barragem de rejeitos que comumente não é considerado, no entanto, é o transporte de sedimentos. Segundo Baptista & Lara (2010), o transporte de sedimentos engloba o processo de movimentação de material erodido no canal fluvial, sendo que a complexidade dos fenômenos envolvidos vem gerando certa impossibilidade de estabelecimento de um equacionamento abrangente para representação do processo. No caso de uma ruptura, observa-se que a consideração desse parâmetro pode ocasionar uma resistência a propagação do fluxo pelo vale a jusante, podendo resultar em modificações nas manchas de inundação obtidas e nos parâmetros associados, tais como: velocidades, tempo de chegada da frente de onda e profundidades.

Em vista dessa problemática, o presente estudo se propõe a realizar uma análise da ruptura da Barragem de Fundão, em uma vertente que incorpora a consideração do transporte de sedimentos propagados pelo vale a jusante. A ruptura da Barragem de Fundão ocorreu no dia 05 de novembro de 2015, sendo propagados, aproximadamente, 32 Mm³ de rejeitos pelo vale a jusante (MACHADO, 2017).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o transporte de sedimentos ao longo da onda decorrente da ruptura de uma barragem de rejeitos, a partir da aplicação de modelos numéricos.

2.2 Objetivos Específicos

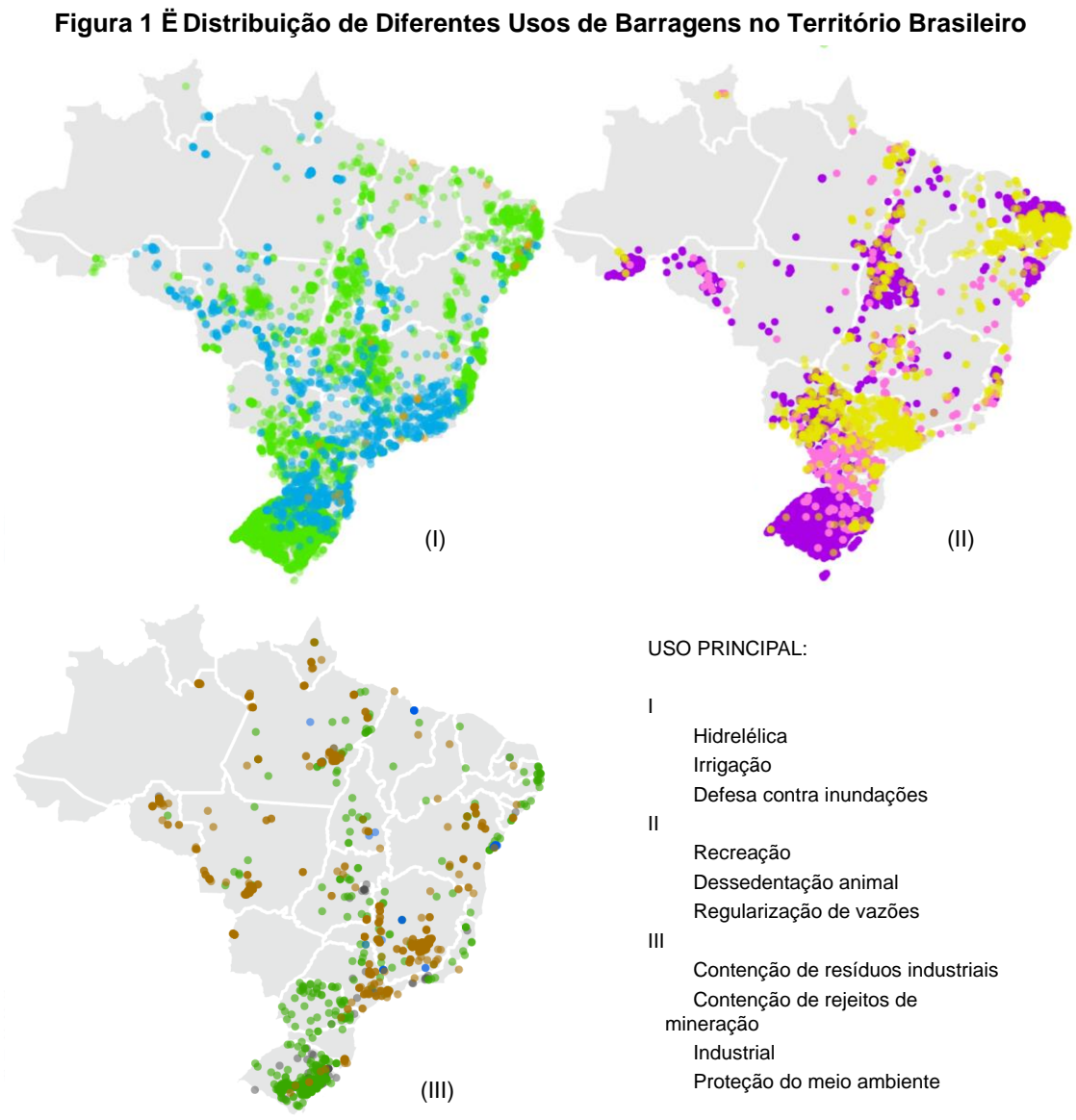
Os objetivos específicos encontram-se apresentados a seguir.

- ◁ Realizar simulações hidráulicas bidimensionais, utilizando o HEC-RAS, considerando fluidos aquosos, hiperconcentrados e com a incorporação dos parâmetros de transporte de sedimentos;
- ◁ Comparar os mapas de inundação gerados, resultantes dos diferentes tipos de escoamento considerados;
- ◁ Analisar os resultados das simulações hidráulicas, de forma a quantificar a diferença resultante das simulações que incorporem o transporte de sedimentos;
- ◁ Analisar as zonas de depósito resultantes das avaliações com a incorporação do transporte de sedimentos e confrontar estes resultados àqueles observados após o evento real de ruptura;
- ◁ Discutir e avaliar a aplicabilidade da incorporação do transporte de sedimentos no problema avaliado, em termos que tangem principalmente o esforço computacional requerido em face aos resultados obtidos nos diferentes tipos de escoamento considerados.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Aspectos Gerais sobre as Barragens no Brasil

As barragens são estruturas que desempenham importante papel na sociedade, podendo apresentar finalidades distintas, tais como: abastecimento de água, geração de energia, defesa contra inundações, recreação, contenção de rejeitos de mineração, entre outros. De acordo com informações apresentadas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), até o primeiro trimestre de 2022 havia um total de 22.590 barragens cadastradas no sistema (ANA, 2022). A Figura 1 apresenta a distribuição de barragens ao longo do território brasileiro, classificadas considerando-se o uso principal de cada estrutura.



Fonte: Adaptado de ANA (2021)

Do total de estruturas cadastradas, 10.060 estão localizadas no Rio Grande do Sul (44,5%), seguido por 1.521 no Mato Grosso do Sul (6,7%), 1.206 no Paraná (5,3%) e 1.001 em Minas Gerais (4,4%). Destaca-se que ao avaliarmos o uso principal das barragens localizadas no Rio Grande do Sul observa-se que 5.871 estruturas são destinadas à irrigação e 3.161 à dessedentação animal, o que corresponde a cerca de 90% do total de barragens cadastradas no estado. Analisando-se apenas as barragens destinadas à contenção de rejeitos de mineração, com um total de 907 barragens (4% do total de estruturas cadastradas), observa-se que predominantemente estas se encontram localizadas no estado de Minas Gerais (352 estruturas cadastradas, ou cerca de 40% das estruturas relativas a esse uso principal). Na sequência, para o uso contenção de rejeitos de mineração, encontra-se o estado do Mato Grosso com 144 barragens (15,9%) (ANA, 2022).

No Brasil, têm-se que a legislação responsável pelo estabelecimento da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, bem como a criação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), é a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Entre os objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) encontra-se garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências. Destaca-se que dois instrumentos principais da política criada (PNSB) são: o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado e o Plano de Segurança da Barragem que, a depender das características da barragem, deveria conter um Plano de Ação de Emergência (PAE) (BRASIL, 2010).

Com a ocorrência do rompimento da Barragem B-I, em Brumadinho (MG), foram propostas alterações na PNSB e foi aprovada a Lei nº 14.066, em 30 de setembro de 2020. Conforme destacado por Silva *et al.* (2020), entre as principais mudanças encontram-se a inserção de um capítulo específico para as infrações e sanções que os proprietários cujas barragens sofrerem rompimentos estarão sujeitos. Além disso, destaca-se que os objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) foram revistos destacando o fomento da prevenção dentro da observância de padrões de segurança, bem como a ampliação da inclusão do Plano de Ação de Emergência

(PAE) no Plano de Segurança da Barragem. A elaboração do PAE passa a ser obrigatória para todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração englobadas pelo PNSB, independentemente da classificação quanto ao dano potencial associado e ao risco (BRASIL, 2020).

O Plano de Ação de Emergência (PAE) é responsável pelo estabelecimento das ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de emergência, bem como a identificação de todos os agentes a serem notificados. Entre as informações presentes neste documento, encontra-se: compilação de informações da estrutura e detalhamento de possíveis situações de emergência, proposição de procedimentos preventivos e corretivos para solucionar possíveis situações de emergência identificadas, programas de treinamentos e estabelecimento de fluxos de comunicação entre os envolvidos (BRASIL, 2020). Salienta-se que a Resolução Nº 95, de fevereiro de 2022, objetiva consolidar os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração, estando elencados em detalhes no Anexo II da referida legislação, todos os elementos mínimos necessários para a elaboração do PAEBM (Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração) (ANM, 2022).

Para a elaboração do PAEBM é necessário o conhecimento da delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) e da Zona de Segurança Secundária (ZSS). Conforme definição apresentada na Resolução Nº 95, a ZAS corresponde ao trecho do vale a jusante da barragem em que não haja tempo suficiente para intervenção da autoridade competente em situação de emergência, sendo responsabilidade do empreendedor os avisos de alerta à população, ao passo que a ZSS corresponde ao trecho constante do mapa de inundação não definido como ZAS. Para a definição da ZAS, deve-se adotar a maior entre as seguintes distâncias: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a 30 (trinta) minutos ou 10 km (dez quilômetros) (ANM, 2022).

Dentro desse contexto apresentado, destaca-se que a realização dos estudos de Ruptura Hipotética, ou estudo de *Dam Break*, é um dos principais subsídios para a elaboração do PAEBM. Tais estudos tem como objetivo a realização de uma modelagem hidrodinâmica da inundação potencial associada a ruptura hipotética de determinada estrutura, permitindo assim, através das modelagens realizadas, a

delimitação de potenciais áreas atingidas a jusante. Salienta-se que a propagação hidrodinâmica corresponde à determinação dos níveis de água e velocidades associadas à passagem de um hidrograma em um curso de água (SALIBA, 2009).

3.2 Aspectos Gerais sobre a Ruptura de Barragens

As barragens proporcionam inúmeros benefícios. Estas estruturas, entretanto, independentemente do seu tamanho, apresentam certo potencial de ruptura, cujas consequências podem gerar danos às populações, ao meio ambiente e à economia (ANA, 2021). Ao longo da história foram registrados diversos casos de ruptura de barragens, muitas vezes com danos desastrosos para as esferas envolvidas.

A Tabela 1 apresenta alguns casos de rupturas de barragens ocorridas no Brasil na última década. Destaca-se que o rompimento da Barragem de Fundão é considerado a maior tragédia ambiental do país (BANDINI *et al.*, 2019) enquanto o rompimento da barragem em Brumadinho constitui o maior acidente de trabalho já registrado no Brasil (BBC NEWS BRASIL, 2019).

Tabela 1 É Casos de Ruptura de Barragens no Brasil na Última Década

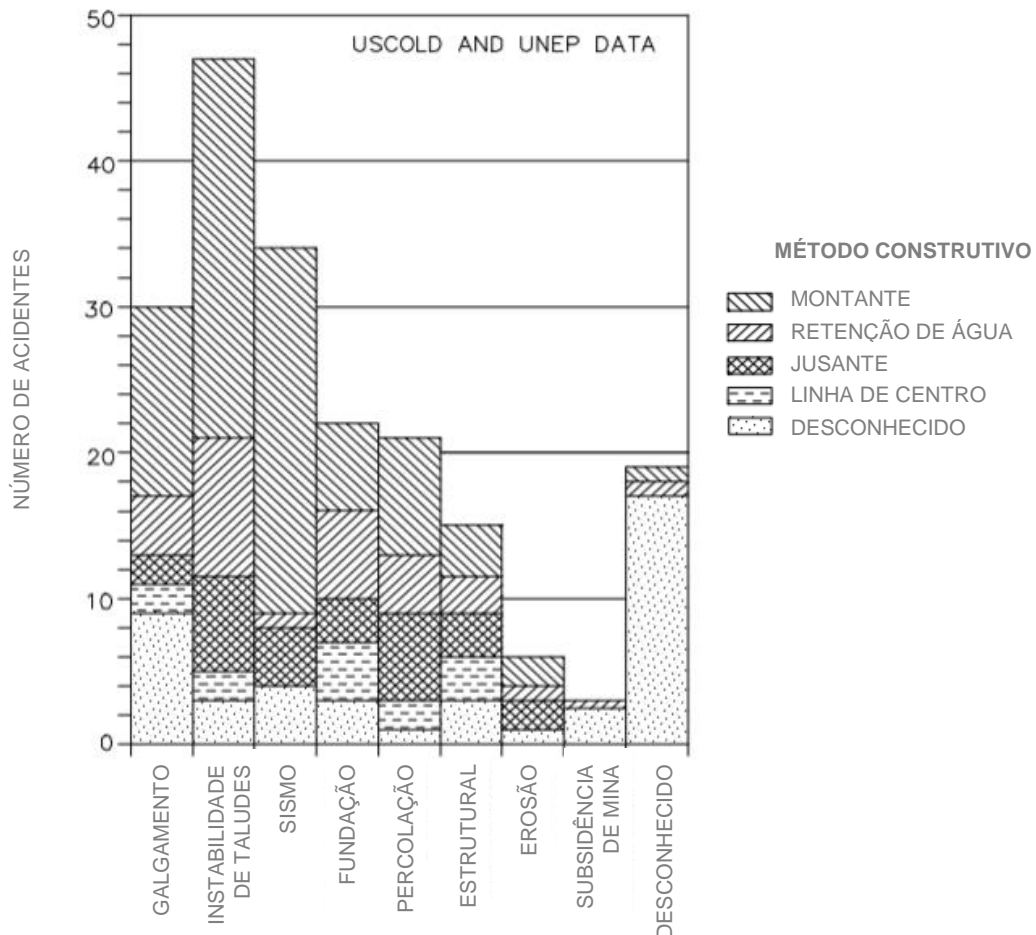
Data	Localização	Companhia Responsável	Tipo de minério	Nº de vítimas Fatais
01 outubro de 2019	Nossa Senhora do Livramento (Mato Grosso)	VM Mineração e Construção, Cuiabá	Ouro	-
29 março de 2019	Machadinho d'Oeste (Oriente Novo, RO)	Metalmig Mineração Indústria e Comércio S/A	Estanho	-
25 janeiro de 2019	Córrego do Feijão (Brumadinho, MG)	Vale SA	Ferro	259 mortos/ 11 desaparecidos
05 novembro de 2015	Barragem Fundão (Mariana, MG)	Samarco Mineração S.A.	Ferro	17 mortos/ 2 desaparecido
10 setembro de 2014	Herculano (Itabirito, MG)	Herculano Mineração Ltda	Ferro	2 mortos/ 1 desaparecido

Fonte: Adaptado de WISE URANIUM [s.n.]

Segundo dados apresentados por ICOLD (2001), ilustrados na Figura 2, observa-se que entre as principais causas de ruptura destacam-se a instabilidade de taludes, os terremotos e o galgamento. O método construtivo associado ao maior número de rupturas é o método alteamento por montante. Contudo, vale ressaltar que a maior

parte das estruturas dentro da amostra analisada haviam sido construídas pelo método de montante (aproximadamente 40% dos 221 casos avaliados).

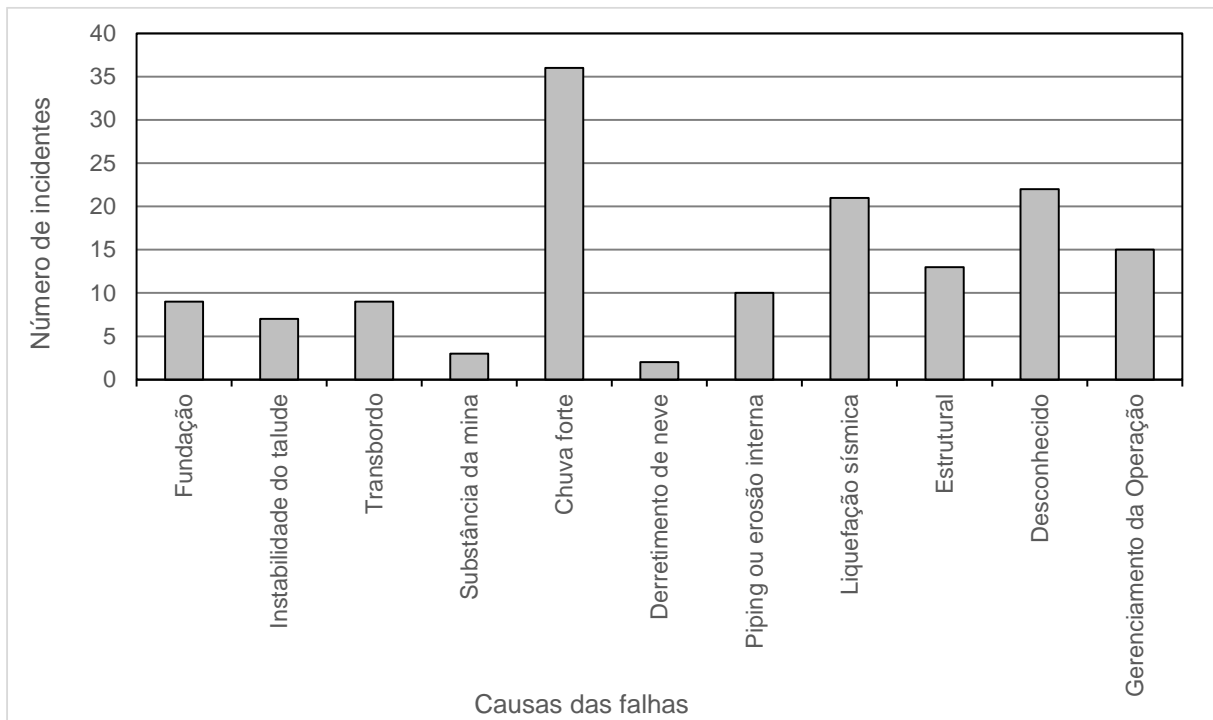
Figura 2 Incidentes em Barragens de Rejeito



Fonte: Adaptado de ICOLD (2001)

No que tange as principais causas de ruptura, destaca-se que outros autores apresentam diferentes classificações, além de indicarem variações ao apontarem as maiores causas de ruptura. Em uma avaliação englobando 147 barragens de rejeitos, Rico *et al.* (2008) indicaram 10 possíveis causas de ruptura, constatando que o maior número de falhas está associado a chuvas intensas, liquefação sísmica e falhas na gestão operacional, conforme ilustrado na Figura 3.

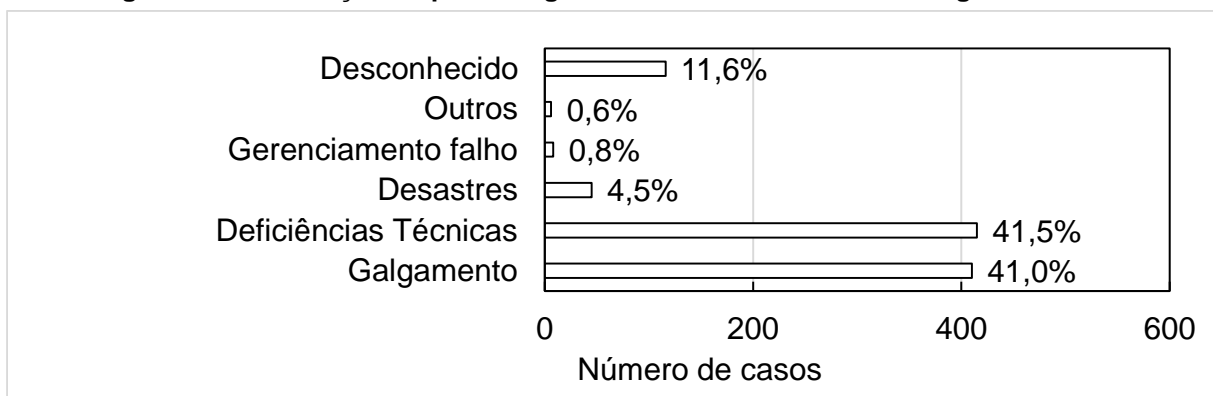
Figura 3 É Distribuição do Número de Incidentes por Causa no Mundo



Fonte: Adaptado de Rico *et al.* (2008)

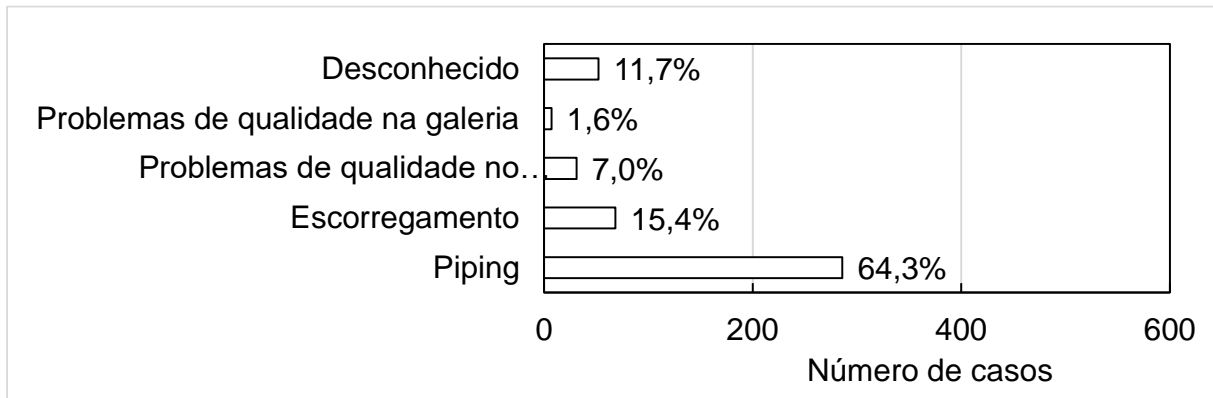
Já Zhang *et al.* (2009), em uma análise englobando mais de 1.600 casos de falhas de barragens ao redor do mundo, categorizaram os modos de falhas em 5 grupos de causas principais (conforme Figura 4), os quais abrangem sub-causas relacionadas. A Figura 5 aponta as principais deficiências técnicas que levam a ruptura de barragens de terra, ao passo que a Tabela 2 apresenta as categorias de causas de falha de barragens compiladas pelos autores, que indicaram a partir de suas conclusões que as causas mais comuns de ruptura de barragens de terra são o galgamento e o *piping*.

Figura 4 É Distribuição da porcentagem de causas de falha de barragens de terra



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2009)

Figura 5 É Distribuição da porcentagem de deficiência técnicas para a causa de falha de barragens de terra



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2009)

Tabela 2 É Causas e sub-causas do rompimento de barragens

Causas	Sub-causas
Galgamento	(1) Capacidade do vertedor insuficiente; (2) Eventos de chuva extrema, excedendo a capacidade do sistema.
Deficiências técnicas	(1) Piping do maciço; (2) Escorregamento do maciço; (3) Piping na fundação; (4) Piping ao redor do vertedor; (5) Problemas de qualidade nos vertedores; (6) Piping em bueiros ou outras estruturas embutidas; (7) Problemas de qualidade em bueiros ou outras estruturas embutidas.
Gerenciamento falho	(1) Diminuição da capacidade do reservatório para passagem das cheias, devido a deposição excessiva de rejeitos; (2) Falha na manutenção e operação; (3) Correção tardia de aumento temporário na elevação da soleira do vertedouro; (4) Problema organizacional: responsabilidade pelo gerenciamento da barragem não definido de forma clara.
Desastres	(1) Terremotos; (2) Guerras e ataques terroristas; (3) Rompimento de uma barragem de montante; (4) Deslizamentos no reservatório; (5) Ninho de roedores.
Outros	(1) Obstrução do vertedouro devido a escorregamento de solo na margem do reservatório; (2) Formação de brecha, devido a escavação no maciço para liberação do fluxo; (3) Opções de projeto ruins; (4) Planejamento inadequado do layout geral do projeto da barragem.

Fonte: Zhang *et al.* (2009)

Destaca-se que, entre os tipos de barramentos existentes, é observada uma maior susceptibilidade a falhas nas estruturas destinadas à contenção de rejeitos de mineração. Azam & Li (2010) apontam que a taxa de rompimento de barragens de

rejeitos nos últimos 100 anos (1,2%) é mais de duas ordens de grandeza maior do que a taxa de falha de barragens de retenção de água convencionais, reportada como 0,01%. Apesar da possibilidade de aplicação de métodos de projeto e construção similares para estas estruturas, existem algumas diferenças entre os dois tipos. Enquanto as barragens convencionais são estruturas de prestígio, utilizadas de forma lucrativa, as barragens de rejeito são utilizadas para o armazenamento de resíduos indesejados, preferencialmente a um menor custo possível (ICOLD, 2001).

Rico *et al.* (2008) destacam cinco características particulares das barragens de rejeitos que as tornam mais vulneráveis a eventuais falhas, quando comparadas às barragens convencionais: (1) os barramentos são construídos por materiais disponíveis no local, que podem apresentar qualidade inferior (solo, resíduos grossos, estéril de operações de mineração e rejeitos); (2) necessidade de alteamentos constantes, para lidar com os aumentos no volume depositado; (3) falta de regulamentação sobre critérios específicos de projeto; (4) necessidade de monitoramento e controle contínuos durante as etapas de implantação, construção e operação da barragem; (5) alto custo das obras de remediação após o encerramento das atividades de mineração.

O impacto da ruptura de uma barragem depende da forma como ocorre a propagação da onda de ruptura pelo vale a jusante, bem como de aspetos relacionados à exposição e vulnerabilidade de bens, população, uso do solo e da água e a biodiversidade existente a jusante. Além disso, as barragens de rejeitos possuem características muito diversas (tipo de barragem, situação da barragem, alteamento, características da fundação e volume e altura da barragem, por exemplo), tornando, assim, muito especulativa qualquer previsão universal dos impactos da ruptura de barragens (RICO *et al.*, 2008a). Dentro desse contexto, reforça-se a importância de que sejam realizados estudos que busquem comparar resultados obtidos a partir de modelagens numéricas àqueles efetivamente observados em casos históricos de ruptura (e.g. Rocha, 2015; Vianini Neto, 2016; Machado, 2017; Brandão, 2019).

3.3 Aspectos Gerais sobre a Ruptura de Barragens

A mineração é essencial para a manutenção da sociedade (BOGER, 2013), sendo umas das principais atividades econômicas do Brasil. Durante o processo de

exploração das jazidas são obtidos, além do minério, materiais de baixo valor agregado. Estes correspondem aos estéreis, provenientes dos processos de decapeamento da mina, e aos rejeitos, provenientes dos processos de beneficiamento. Esses materiais são usualmente descartados na forma de barragens ou empilhamentos drenados (FERREIRA, 2016).

3.3.1 Disposição dos Rejeitos

A água presente por volume ou peso da massa total de rejeito configura como a diferença principal entre as concentrações encontradas nos rejeitos (RIBEIRO, 2015). Os rejeitos podem ser produtos na forma de polpa, pasta ou torta, conforme encontra-se ilustrado na Figura 6.

Figura 6 É Rejeito na forma de Polpa (a), Pasta (b) e Torta (c)
 (a) Polpa (b) Pasta (c) Torta



Fonte: Adaptado de Dias (2017) e Boger (2013)

Conforme destacado por Boger (2013), os rejeitos em forma de polpa apresentam uma baixa concentração de sólidos e com isso seu comportamento se aproxima ao de um fluido newtoniano. O autor pontua que, a medida que é observado um aumento da concentração, o material se altera de um rejeito espessado para uma pasta e as propriedades passam de um fluido newtoniano para um fluido não-newtoniano. Os fluidos newtonianos são aqueles que apresentam a tensão cisalhante diretamente proporcional a taxa de deformação angular, como é o caso da água. Já os fluidos não-newtonianos são aqueles nos quais a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação angular é dependente do valor da tensão de cisalhamento e do tempo de aplicação desta (SILVA *et al.*, 2019).

Conforme mencionado por Machado (2017), uma vez que os rejeitos constituem materiais que não possuem valor significativo econômico agregado, eles representam

uma constante preocupação para as empresas que precisam realizar sua disposição. Com isso, para a realização desta disposição dos rejeitos, a autora destaca que as empresas buscam soluções que combinem fatores tais como: a minimização dos impactos ambientais associados a um menor custo para a sua contenção e segurança.

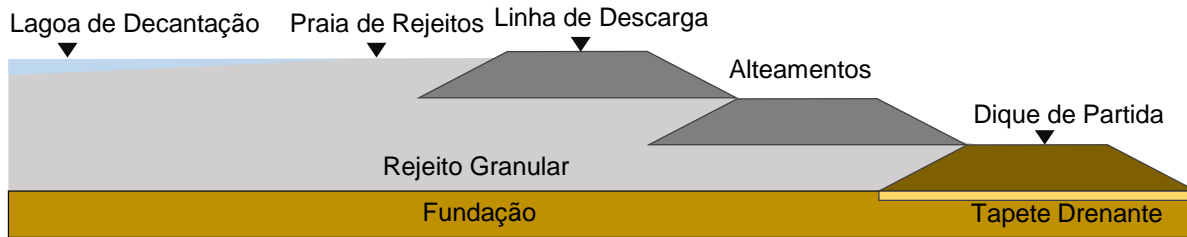
Thomé & Passini. (2018) salientam que a escolha da concentração de sólidos com a qual o rejeito será descartado baseia-se em critérios técnico-econômicos. A redução da umidade do rejeito apresenta como vantagens a possibilidade de reintrodução da água no processo de concentração, promovendo uma diminuição da demanda hídrica, e a indução a uma menor suscetibilidade de risco de acidentes envolvendo a estrutura de contenção, uma vez que essa torta passa a apresentar um comportamento mais próximo de um solo argiloso, com um potencial de liquefação reduzido. Essa alternativa apresenta, entretanto, um custo elevado, sendo ainda pouco atrativa aos empreendedores. A disposição sob a forma de polpa, mesmo sendo a modalidade mais propensa a acidentes, é ainda o método mais utilizado no Brasil (THOMÉ & PASSINI, 2018).

Em vista disso, ao avaliarmos o aspecto de disposição de rejeitos com base no tipo de estrutura de disposição (empilhamentos drenados ou barragens), Machado (2017) indica que os aspectos econômicos levam as empresas a optarem pela realização da disposição dos rejeitos em sistemas de barragens, em muitos casos tendo-se utilizado o próprio rejeito como parte da estrutura do barramento. Salienta-se que, embora se esperem mudanças neste paradigma nos próximos anos, as estruturas antigas permanecerão ainda como passivos a solucionar.

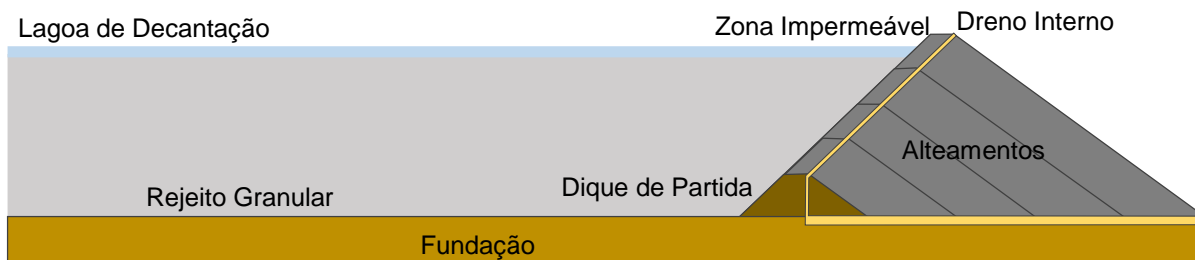
Em termos de disposição em sistemas de barragens de rejeitos, destacam-se três métodos principais: o método de montante, o método de jusante e o método de linha de centro. A Figura 7 apresenta uma seção típica de cada um dos métodos citados.

Figura 7 - Seções Típicas E Métodos de Alteamento de Barragens

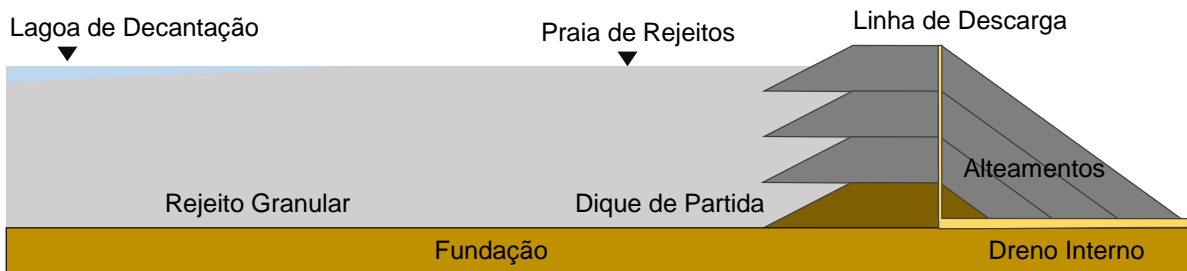
(a) Barragem Alteada para Montante



(b) Barragem Alteada para Jusante



(c) Barragem Alteada pela Linha de Centro



Fonte: Adaptado de Albuquerque Filho (2004)

O método de alteamento para montante consiste na construção e alteamento do barramento em direção ao reservatório, sobre o rejeito já consolidado. Já o método de alteamento para jusante consiste na construção e alteamento do barramento em regiões de fundação natural. Por fim, o alteamento pela linha de centro consiste na construção e alteamento do barramento tanto à montante quanto à jusante, seguindo uma linha de centro, que corresponde a um eixo vertical, a montante do qual o alteamento é realizado sobre o rejeito depositado e a jusante sobre o próprio barramento (CARDOZO *et al.*, 2017).

Salienta-se que o método de alteamento para montante se caracteriza pelo menor custo de construção, maior velocidade de alteamento e pouca utilização de equipamentos de terraplanagem. Por outro lado, trata-se do método com menor segurança, em especial em função da capacidade de liquefação da massa de rejeitos

saturada e da proximidade da linha freática ao talude de jusante, podendo ocasionar o fenômeno da erosão interna (THOMÉ & PASSINI, 2018). O método de alteamento por jusante é o mais seguro, porém com o maior custo associado. O método de alteamento por linha de centro corresponde a uma alternativa intermediária em termos de custos.

O aumento das pressões e exigências dos órgãos ambientais, o aumento expressivo do volume dos rejeitos gerados, a escassez de áreas para a disposição e a crescente dificuldade de aquisição de outorgas que permitam a utilização de água nova em processos de beneficiamento são fatores que vêm impulsionando a evolução das técnicas de disposição de rejeitos (RIBEIRO, 2015). A esses fatores, somam-se os recentes acidentes envolvendo barragens de disposição de rejeitos, como o caso da Barragem de Fundão (em 2015) e da Barragem B-I, em Brumadinho (em 2019), que constituem pontos chave para impulsionar e acelerar a ocorrência de aprimoramentos.

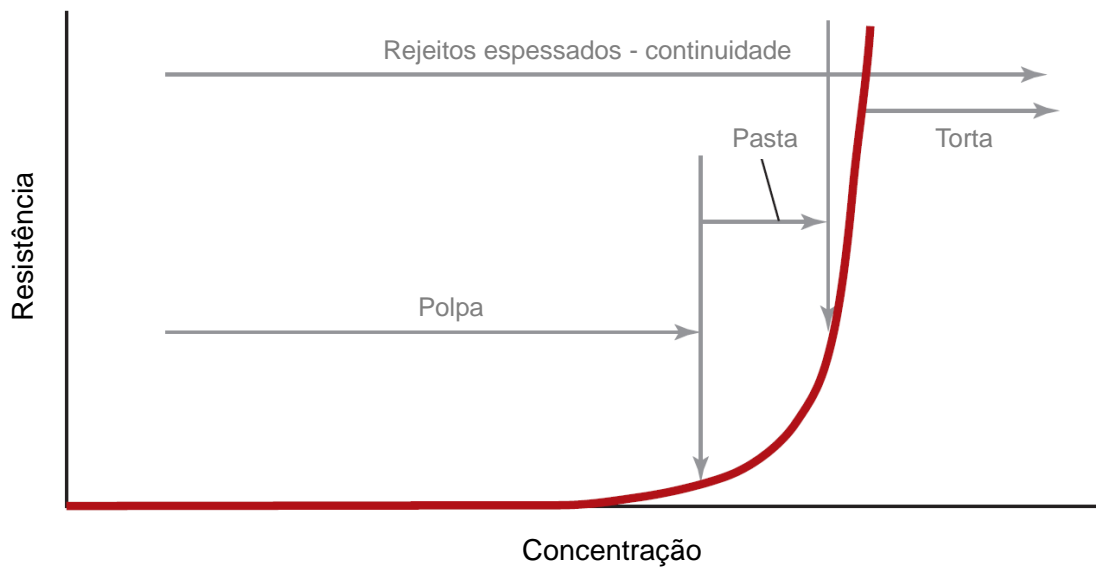
A ocorrência desses acidentes geram ainda uma urgência na realização de adequações nas legislações de referência, de forma a estas serem mais assertivas e auxiliarem na minimização do risco de ocorrência de acidentes. Cita-se, como exemplo, questões relacionadas ao método de alteamento das barragens, uma vez que ambas as Barragens de Fundão e B-I eram alteadas pelo método de montante. A Resolução Nº 95 estabelece medidas regulatórias para as barragens alteadas por esse método de montante, ou método declarado como desconhecido. É indicada, conforme apresentado no Art. 58º, a realização da descaracterização destas estruturas, bem como a realização de estabilização da barragem existente ou a construção de uma nova estrutura de contenção a jusante, com a finalidade de minimizar o risco de rompimento, em especial por liquefação, e de reduzir o dano potencial associado (ANM, 2022).

3.3.2 Reologia dos Rejeitos

O termo reologia significa o estudo da deformação e fluxo da matéria (BARNES *et al.*, 1993). No caso específico da indústria mineral, Boger (2013) destaca a grande variabilidade de cada sistema, uma vez que a reologia dos rejeitos depende do tamanho da partícula, distribuição do tamanho das partículas, concentração e química.

A viscosidade e a tensão limite de escoamento são os principais parâmetros reológicos para a engenharia, sendo parâmetros que variam exponencialmente com a concentração volumétrica (ou teor de sólidos) do rejeito (MACHADO *et al.*, 2017). É possível observar, pela Figura 8 um gráfico que apresenta a correlação entre a resistência dos rejeitos ao escoamento, ou tensão limite de escoamento, e a concentração de sólidos ou consistência.

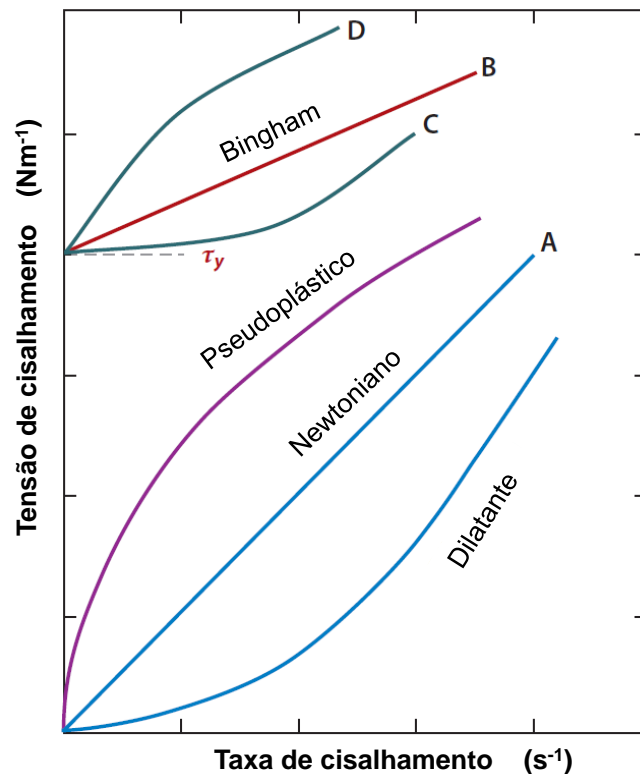
Figura 8 Resistência ao escoamento versus concentração em suspensão de rejeitos



Fonte: Adaptado de Boger (2013)

Os fluidos podem ser classificados essencialmente em fluidos newtonianos ou não newtonianos. De forma a exemplificar o comportamento geral dos fluidos, apresenta-se na Figura 9 a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento.

Figura 9 Resistência ao escoamento versus concentração em suspensão de rejeitos



Fonte: Adaptado de Boger (2013)

Os fluidos newtonianos apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada (τ) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$). O fluxo é iniciado assim que uma tensão de cisalhamento é aplicada. A relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento indica uma viscosidade constante (reta A) (BOGER, 2013).

Já os fluidos que são caracterizados como não-newtonianos não expressam essa linearidade característica dos newtonianos, sendo a tensão de escoamento, τ_y , a tensão de cisalhamento crítica que deve ser excedida antes de ser irreversível a deformação e o escoamento ocorrer (demais curvas e reta B) (BOGER, 2013).

A reta B apresenta o comumente conhecido como comportamento *Bingham*, em que a partir da aplicação de uma determinada tensão de escoamento observa-se uma relação tensão de cisalhamento linear-taxa de cisalhamento, sendo o gradiente dessa linha conhecido como viscosidade plástica de *Bingham* (BOGER, 2013).

Em caso de uma ruptura de uma barragem de rejeitos, conforme apontado por Machado (2017), em função da decantação das partículas sólidas em suspensão e

posterior recirculação de água liberada, o fluido propagado poderá conter alto teor de sólidos e, assim, apresentar características de um fluido não-newtoniano.

Conforme indicado na Resolução Nº 95, para a elaboração do mapa de inundação de determinada estrutura, é necessário que o deslocamento da frente de onda seja realizado considerando-se, minimamente, um modelo 2D e contemplando o acréscimo de materiais que a onda carreará em seu deslocamento. Por conseguinte, os estudos deverão englobar a caracterização geotécnica e reológica dos materiais passíveis de mobilização na ruptura; a classificação dos rejeitos ou sedimentos armazenados no reservatório e a topografia atual e primitiva do reservatório (ANM, 2022).

A evolução do arcabouço legal no que se refere as barragens de rejeitos mostra-se cada vez mais atenta ao impacto dos rejeitos ou sedimentos em uma ruptura de barragem. Dessa forma, o entendimento e determinação das propriedades geotécnicas e reológicas dos materiais envolvidos é cada vez mais relevante para a avaliação do deslocamento da frente de onda em estudos de modelagem hipotética de barragens, ou estudos de *Dam Break*. A partir desta conjuntura, o presente estudo foca na avaliação do transporte de sedimentos em uma ruptura de barragem, a seguir discutido em maiores detalhes.

3.4 Transporte de Sedimentos

O transporte de sedimentos é o termo geral utilizado para o transporte de material (por exemplo, areia ou lama) em rios e córregos, sendo observado de duas formas distintas: transporte em suspensão e por arraste. O primeiro termo se refere aos grãos mantidos em suspensão pelo escoamento ao passo que o segundo é relativo ao movimento dos grãos junto ao leito (CHANSON, 2004).

Conforme pontuado por Graf (2010), a questão relativa à compreensão e formulação do movimento e transporte de partículas granulares sólidas em ou através de corpos líquidos é de suma importância dentro das áreas hidráulica, geomorfologia fluvial e outras. O autor ressalta, entretanto, que trata-se de um problema complicado, frequentemente sujeito a tratamento semiempírico ou empírico.

De forma geral, as equações de transporte de sedimentos são usadas para comparar a carga de sedimentos e a energia do curso da água. Caso haja energia em excesso depois que a carga é movida, o ajuste do canal ocorre à medida que o fluxo incorpora mais carga erodindo suas margens ou limpando seu leito. No entanto, independentemente da complexidade incorporada às equações deste tipo, elas se relacionam com as relações básicas de equilíbrio descritas por Lane (FISRWG, 2001).

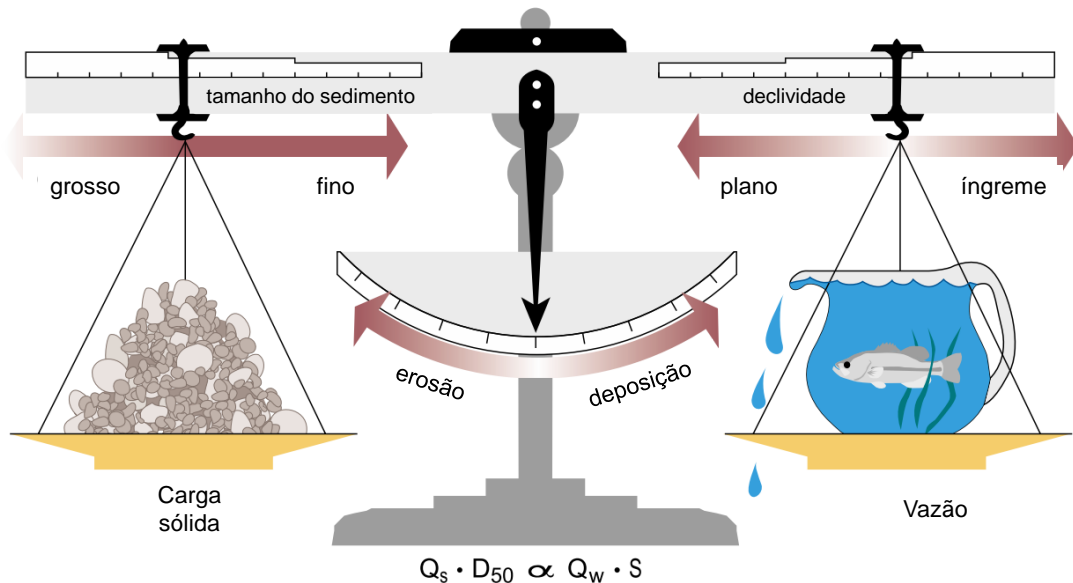
Esse equilíbrio, estabelecido por Lane (1954), considerada uma regra da natureza, envolve a interação de quatro fatores básicos:

$$Q_s D_{50} \propto Q_w S \quad (1)$$

Na qual: Q_s é a descarga sólida; D_{50} é o diâmetro médio das partículas; Q_w é a descarga líquida e S é a declividade longitudinal.

A relação de Lane é representada na forma de uma balança, na qual indicam-se os elementos e sua relação para o estabelecimento de um equilíbrio em um canal fluvial, conforme ilustrado na Figura 10. Embora não seja uma expressão proposta com objetivos quantitativos, pois não fornece os valores quantitativos das variáveis envolvidas no equilíbrio, Lane (1954) destaca que ela é muito útil na indicação de forma qualitativa das mudanças que ocorrerão em um fluxo quando houver alteração de alguma das variáveis

Figura 10 É Relacionamento entre os fatores que contribuem para estabelecer um equilíbrio estável em um canal fluvial, conforme equação de Lane



Fonte: Adaptado de FISRWG (2001)

A equação de Lane indica que um canal se manterá em equilíbrio dinâmico quando as mudanças carga de sedimentos e no tamanho do material do leito forem equilibradas por mudanças no fluxo ou gradiente do canal. Uma mudança em uma das variáveis gera por consequência uma mudança em uma ou mais das outras variáveis, de modo que o equilíbrio dinâmico é restabelecido (FISRWG, 2001).

Cordeiro (2022) destaca que, em uma condição de equilíbrio, considerando-se um determinado intervalo de tempo, a quantidade de sedimentos erodidos do leito deve corresponder à quantidade depositada no mesmo intervalo, de forma a garantir a estabilidade da calha fluvial

3.4.1 Geomorfologia Fluvial

Um dos conceitos relevantes para o entendimento da dinâmica dos canais fluviais, e consequentemente do transporte de sedimentos, é a geomorfologia fluvial. A geomorfologia fluvial corresponde ao estudo das interações entre formas e processos de canais fluviais em uma variedade de escalas de espaço e tempo, sendo a influência de eventos passados um aspecto significativo para explicar a forma atual dos canais fluviais (CHARLTON, 2008).

FISRWG (2001) pontua que os processos geomórficos são os mecanismos primários para a formação dos padrões de drenagem, canal, planície de inundação, terraços e outras características de bacias hidrográficas e canais fluviais. A associação destaca três processos geomórficos primários envolvidos com o fluxo de água, a saber:

- ◁ Erosão: corresponde ao desprendimento de partículas do solo;
- ◁ Transporte de Sedimentos: relativo ao movimento de partículas de solo erodido na água;
- ◁ Deposição de sedimentos: referente ao assentamento de partículas de solo erodidas no fundo de um canal fluvial.

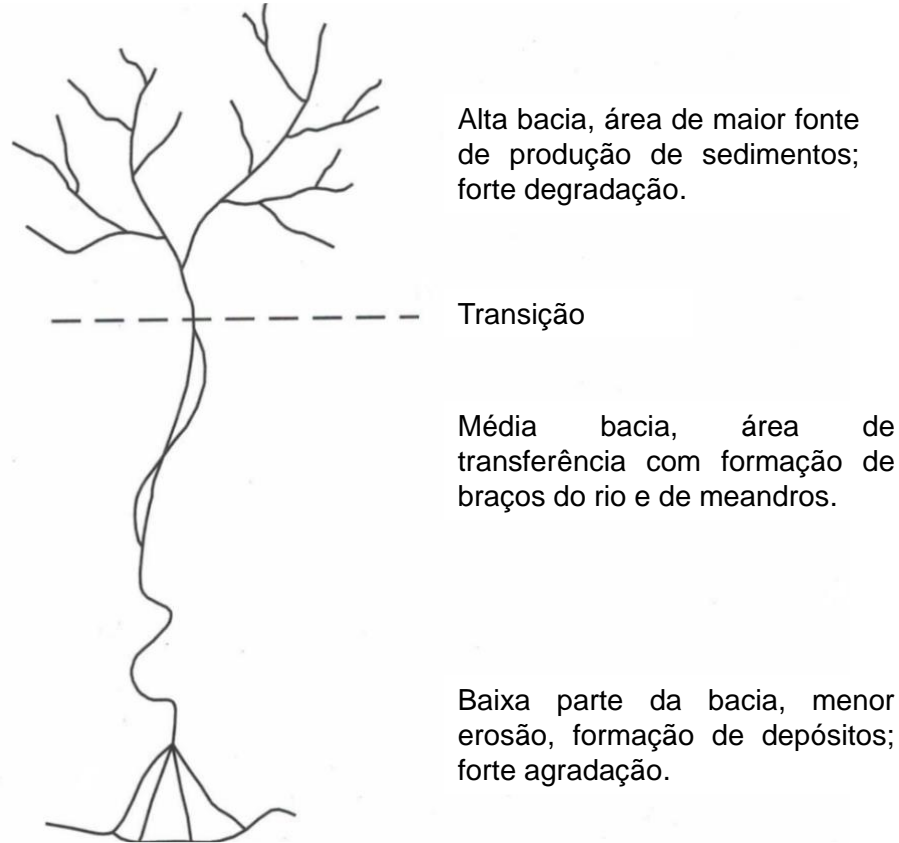
Um sistema fluvial possui distintas zonas morfodinâmicas, que podem ser representadas de forma sucinta em três zonas, com base nos processos dominantes que operam, sendo de montante para jusante: zona de produção, zona de transferência e zona de acumulação (CHARLTON, 2008).

Em termos gerais, a parte mais alta da bacia apresenta maior erosão e transporte de sedimentos, sendo observada uma diminuição do processo erosivo à medida que ocorre um decréscimo das declividades e uma diminuição das chuvas mais intensas, fora das regiões mais montanhosas. Na parte mais baixa da bacia é observada a maior deposição dos sedimentos, com formação de colúvios. Ressalta-se que o comportamento das bacias é, no entanto, muito variável nas diferentes zonas, pois depende de diversos fatores, entre os quais encontram-se, por exemplo, os tipos de rochas e solos, cobertura vegetal, declividades e regime de chuvas (CARVALHO, 2008).

Salienta-se que grande parte das barragens de rejeitos encontram-se situadas nas regiões de cabeceiras, nas quais observa-se um grande potencial natural para produção de sedimentos, seja pela presença de declividades maiores dos leitos, terrenos mais acidentados ou ainda materiais geológicos suscetíveis. Como já demonstrado nas rupturas das barragens de Fundão e B-I, nessas regiões as cheias resultantes da ruptura são imensas, mesmo se comparadas a cheias naturais muito extremas (ex. 10.000 anos ou a cheia máxima provável), e produzem alterações

geomorfológicas muito intensas, que demandam significativos esforços para estabilização fluvial.

Figura 11 É Produção de Sedimentos em uma Bacia Hidrográfica



Fonte: Carvalho (2008, p. 79)

Destaca-se que a compreensão da topografia da bacia hidrográfica é fundamental para entender a dispersão dos rejeitos, uma vez que o sistema fluvial é o responsável pela distribuição e controle do volume de matéria e energia advindas do rompimento de uma barragem (LIMA *et al.*, 2021 *apud* FELIPPE & MENDES, 2022).

3.4.2 Características do leito fluvial e distribuição de sedimentos

O transporte de sedimentos depende das relações estabelecidas entre o fluido em escoamento e as partículas constituintes do leito fluvial. Os leitos fluviais apresentam grande variabilidade de suas características, podendo ser classificados, de forma sucinta, em granulares, constituídos por partículas soltas de diferentes tamanhos e forma, e coesivos, constituídos por materiais mais resistentes à erosão, que apresentam modificações de forma em longos intervalos de tempo (BAPTISTA & LARA, 2010).

Cordeiro (2022) destaca que para a análise das propriedades dos sedimentos é necessário identificar, inicialmente, as características de um único grão e, na sequência, as propriedades relacionadas ao conjunto heterogêneo de grãos. A autora ressalta que tradicionalmente, com relação às dimensões dos sedimentos, os tamanhos de areia e cascalho são classificados de acordo com a escala de Wentworth (1922), apresentada em maiores detalhes na Tabela 3.

Tabela 3 Classificação dos sedimentos conforme faixas granulométricas

Intervalo Granulométrico (mm)		Classificação nominal
> 256		Matacão
256 – 64	Cascalho	Bloco
64 – 4		Seixo
4 – 2		Grânulo
2 – 1		Areia muito grossa
1 – 0,5	Areia	Areia grossa
0,5 – 0,25		Areia média
0,25 – 0,125		Areia fina
0,125 – 0,0625		Areia muito fina
0,0625 – 0,0039		Silte
< 0,0039	Argila	Partícula de argila

Fonte: Adaptado de Wentworth (1922)

Destaca-se, entretanto, que não existe uma única classificação para os intervalos de variação dos diâmetros dos sedimentos para definição das classes granulométricas de referência, sendo observada a existência de diferentes escalas ao redor do mundo. No caso do Brasil, salienta-se que, conforme normatização da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, a norma ABNT/NBR 6502 apresenta a classificação dos solos e rochas, segundo sua granulometria, conforme apresentação indicada na Tabela 4.

Tabela 4 Classificação dos sedimentos conforme faixas granulométricas

Intervalo Granulométrico (mm)		Classificação nominal
> 1.000		Bloco de Rocha
1.000 – 200	Cascalho	Matacão
200 – 60		Seixo
60 – 2		Pedregulho
2 – 0,6		Areia grossa
0,6 – 0,2	Areia	Areia média
0,2 – 0,06		Areia fina
0,06 – 0,002		Silte
< 0,002	Argila	Partícula de argila

Fonte: Adaptado de ABNT/NBR 6502 (1995)

Embora a forma e as dimensões representem propriedades determinantes no comportamento dinâmico dos grãos no escoamento, existe uma grande diversidade de formas nos sedimentos presentes nos canais fluviais, o que torna complexa uma definição exata das dimensões. A dimensão das partículas é obtida, comumente, através de ensaios granulométricos, sendo caracterizada por um D_n , em que o D equivale ao diâmetro da peneira correspondente à passagem de n% do material, em peso. De forma usual, adota-se o valor do D_{50} para representação do diâmetro médio do material (CORDEIRO, 2022).

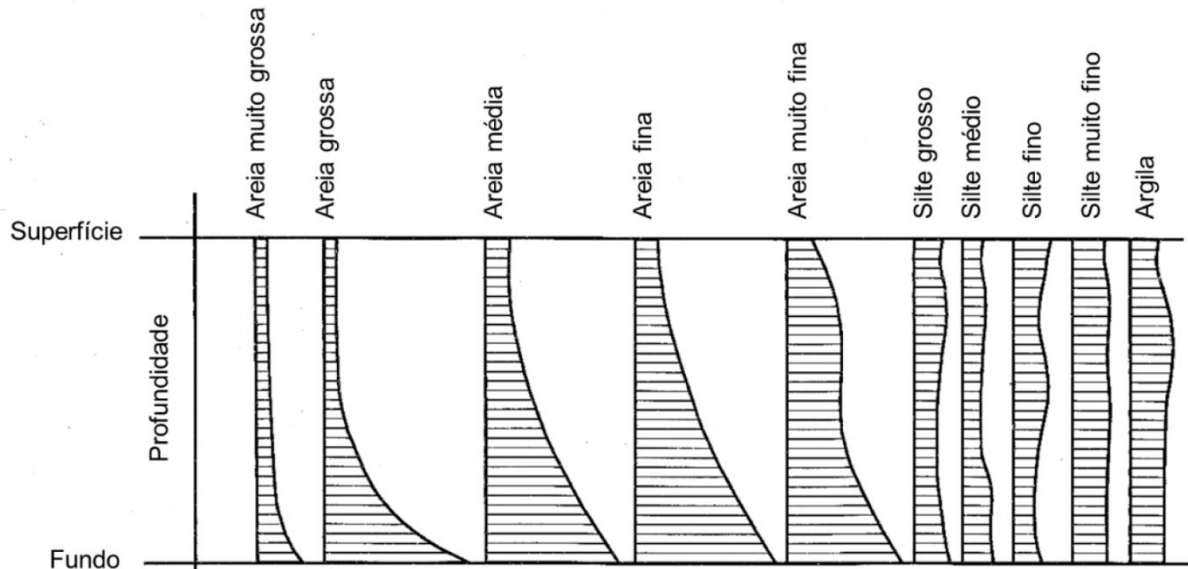
Apesar da propriedade mais importante de uma partícula ou grão de sedimento corresponder ao seu tamanho, essa propriedade por si só não é capaz de descrever o sedimento, sendo fundamentais a consideração de características como forma e a circularidade da partícula (VANONI, 2006). Outra propriedade fundamental para o estudo do transporte de sedimentos corresponde ao peso específico. Salienta-se, conforme apontado por Vanoni (2006), que a maior parte dos sedimentos têm sua origem em material rochoso, sendo o quartzo o mineral mais comumente encontrado nos sedimentos e, com isso, usualmente o peso específico dos materiais granulares (γ_s) costuma ser expresso em função do valor do quartzo, de 2,65 g/cm³, ou valores próximos.

A velocidade de queda do material é outra propriedade com importante papel nos estudos de hidráulica fluvial. Este é um dos parâmetros principais em especial quando é predominante o transporte em suspensão, conforme destaca Cordeiro (2022). A autora cita que, embora o sedimento natural raramente apresente um formato esférico, usualmente utiliza-se a velocidade de queda de uma partícula esférica rígida como mecanismo para aproximação da previsão da velocidade de queda de uma partícula de sedimento em um fluxo natural.

Outro fator de relevância no transporte de sedimentos diz respeito à forma como se dá a distribuição das partículas em suspensão presentes no fluido. Carvalho (2008) indica que as partículas em suspensão estão submetidas, predominantemente, à ação da velocidade do fluxo na direção horizontal e do seu peso. Com isso, a concentração do sedimento apresenta um valor mínimo na superfície e máximo perto do leito, considerando-se diferentes granulometrias. Conforme ilustrado na Figura 12, as

partículas mas finas, como o silte a argila, tendem a apresentar uma distribuição mais uniforme na direção vertical. Destaca-se que grande parte dos rejeitos de minério de ferro possuem granulometria típica de areia muito fina siltosa ou de um silte arenoso.

Figura 12 É Distribuição verticais que podem ser encontradas em corpos hídricos

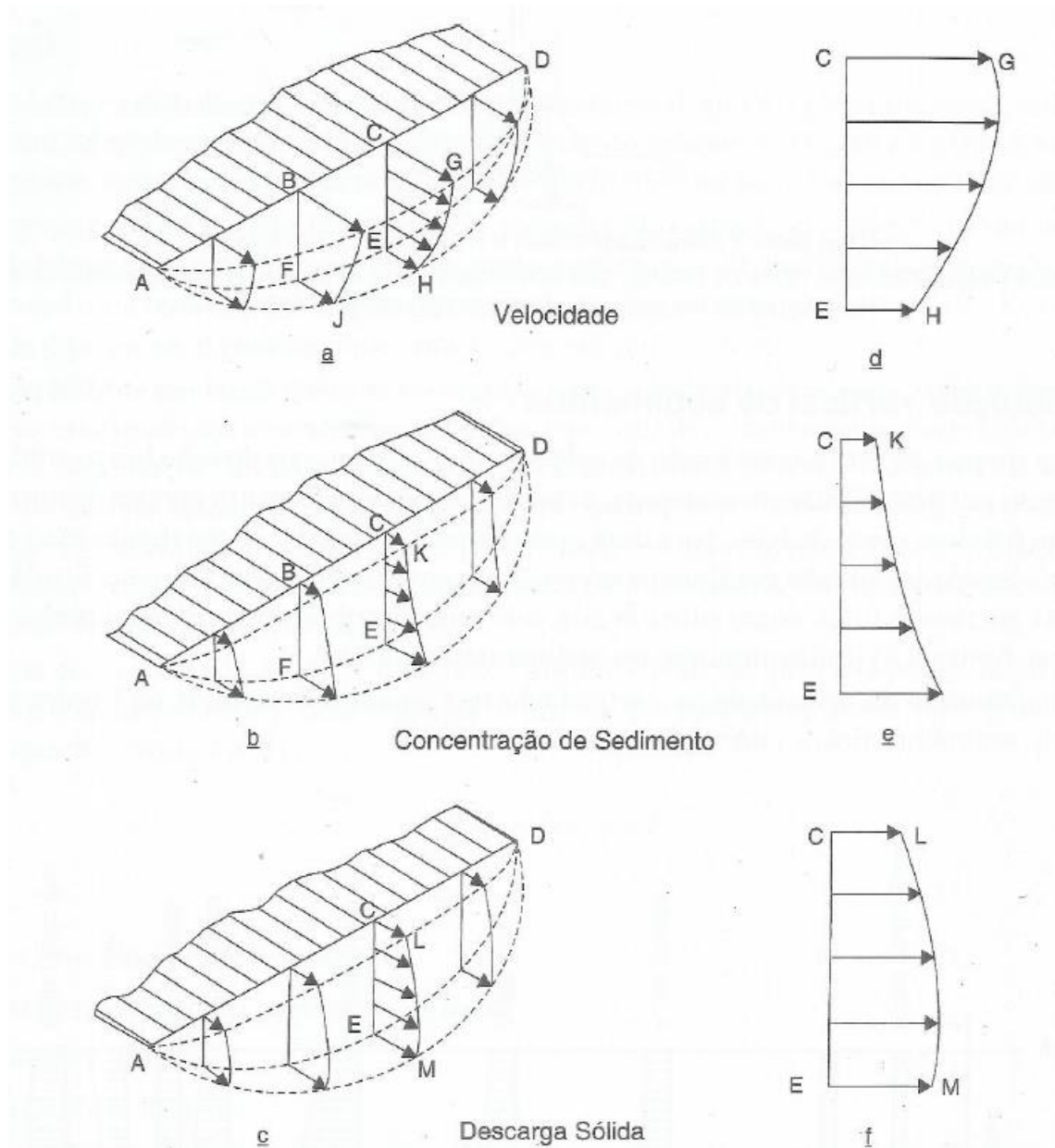


Fonte: Carvalho (2008, p.77)

Quando avaliada a seção transversal de um corpo hídrico, observa-se que a distribuição de sedimentos é variável, sendo, assim, expressa de uma forma mais adequada em termos de concentração. A concentração está associada à velocidade de fluxo, disponibilidade de sedimentos e da sua granulometria. De forma similar à velocidade, a concentração é menor nas margens e aumenta em direção ao centro da seção transversal do escoamento. Já na direção vertical, as velocidades da corrente são variáveis, decrescendo no sentido do leito, fazendo, dessa forma, com que o peso da partícula seja um fator na variação da concentração. Destaca-se, ainda, que a temperatura exerce influência na concentração de sedimentos finos em suspensão. Em águas com temperaturas mais frias, ocorre um aumento da concentração de finos em função da diminuição da viscosidade (CARVALHO, 2008).

As distribuições das velocidades, da concentração de sedimentos e da descarga sólida podem ser visualizadas na Figura 13.

Figura 13 É Diagrama da distribuição da velocidade, concentração de sedimentos e descarga sólida nos corpos hídricos



Fonte: Carvalho (2008, p.78)

3.4.3 Modos de Transporte de Sedimentos

Alguns fatores influenciam a forma como ocorre o transporte de sedimentos, sendo estes fatores as características do fluido, que correspondem as forças hidrodinâmicas presentes, e as características físicas das partículas, em especial as velocidades de queda. Em função das condições apresentadas pode-se observar o fenômeno de sedimentação, que se refere ao processo de deposição das partículas no fundo pela ação da força da gravidade. De forma contrária, é observado o fenômeno da erosão, que ocorre quando as forças hidrodinâmicas exercidas pelo escoamento superam a

resistência oferecida pelas partículas desagregadas, gerando o movimento destas (BAPTISTA & LARA, 2010).

Carvalho (2008) destaca que a razão pela qual as formas de transporte de sedimento sólido são discutidas separadamente é o fato de que o fenômeno não está suficientemente entendido, de maneira a permitir que seja explicado de forma completa e inter-relacionada. O autor destaca que o transporte em suspensão é uma função predominantemente da velocidade da corrente, ao passo que o transporte do leito é muito influenciado pelo atrito que atua no seu deslocamento.

Usualmente admite-se como formas de transporte de sedimentos a definição do *Subcommittee on Sedimentation* (1963), da forma que se segue:

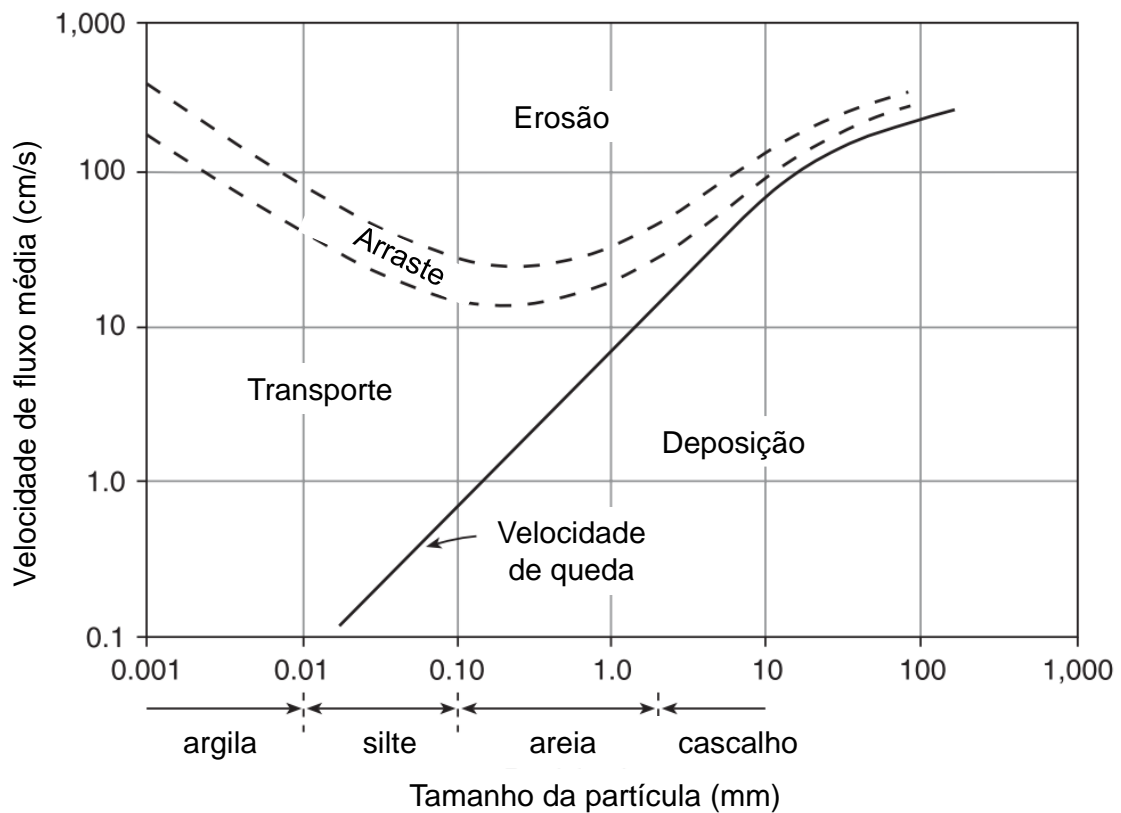
- ◁ **Carga Sólida de Arraste:** correspondem às partículas que rolam ou escorregam longitudinalmente em contato com o leito fluvial. As partículas estão em contato com o leito praticamente todo o tempo;
- ◁ **Carga Sólida Saltante:** são as partículas que por efeito do fluxo ou devido ao impacto de outras partículas saem de contato com o leito e são arremessadas no fluxo, pulando ao longo do curso hídrico. O impulso inicial que lança a partícula no fluxo pode ser devido ao choque de uma partícula com outra, ao rolamento de uma por cima da outra ou ao fluxo de água sobre a superfície curva de uma partícula, produzindo dessa forma uma pressão negativa;
- ◁ **Carga Sólida em Suspensão:** relativo as partículas suportadas por componentes das velocidades em fluxo turbulento, enquanto são transportadas pela corrente por meio das componentes horizontais dessas velocidades. Todas as partículas são suficientemente pequenas para que permaneçam em suspensão, deslocando-se para cima e para baixo no fluxo.

Graf (2010) destaca que o início do movimento do material do leito pode ser explicado de diferentes maneiras: a velocidade crítica, considerando o impacto do líquido na partícula, a tensão de cisalhamento crítica, que considera os efeitos da tensão de arraste causada pelo fluxo nas partículas e as forças de sustentação, que considera a diferença de pressão devido ao gradiente de velocidade. O autor salienta que quando o movimento das partículas sólidas é tal que estas passam a estar

circundadas pelo fluido, considera-se que elas se movem em suspensão. Neste caso, devido ao peso das partículas, existe uma tendência à sedimentação, que acaba sendo contrabalanceada pela turbulência do fluxo. Dessa forma, as condições hidráulicas do escoamento determinam se e quando uma determinada fração do material estará em suspensão, bem como estabelecem uma relação de trocas ativa entre a carga suspensa e a carga de fundo.

A definição das condições iniciais para o arraste de partículas de um determinado tamanho podem ser realizadas a partir de uma velocidade média crítica ou de uma tensão de cisalhamento crítica do leito. Ambas as relações mostram tendências básicas semelhantes, embora o uso da velocidade média do fluxo represente um método indireto (CHARLTON, 2008). As curvas de velocidade média do fluxo (Figura 14), derivadas de dados experimentais acumulados por Filip Hjulstrøm na década de 1930, apresentam as velocidade de arraste e queda (ou sedimentação) para partículas de diferentes tamanhos, desde argila fina até cascalho grosso e pequenos pedregulhos.

Figura 14 É Diagrama Hjulström, mostrando a velocidade média do fluxo na qual partículas de um determinado tamanho são arrastadas, transportadas e depositadas

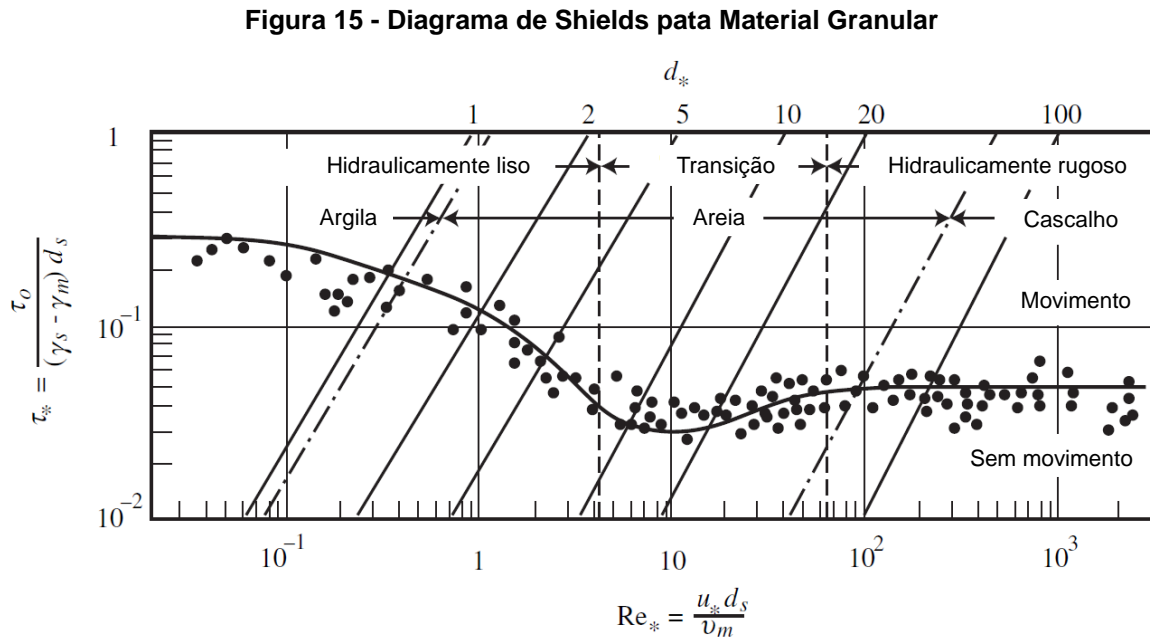


Fonte: Adaptado de Charlton (2008, p.101)

Uma abordagem alternativa, que conforme destacado por Charlton (2008), é mais relevante para a teoria moderna do transporte de sedimentos, foi elaborada pelo engenheiro americano Albert Shields em 1936 e define a tensão de cisalhamento do leito crítica necessária para que uma partícula de determinado tamanho entre em movimento.

A ação da água, promotora do movimento, pode ser caracterizada pela tensão de arraste, ao passo que a força estabilizadora é caracterizada pelo peso submerso das partículas. A partir dessas variáveis define-se um parâmetro adimensional que corresponde à tensão de arraste adimensional. Analogamente, por meio da relação de uma velocidade de arraste resultante da ação da água sobre o fundo, que é definida a partir da tensão de arraste no fundo e massa específica, chega-se a outro parâmetro adimensional, o Número de Reynolds de Arraste. Este traduz a razão entre forças inerciais e viscosas em torno das partículas (BAPTISTA & LARA, 2010).

A partir das duas variáveis adimensionais é construído o Diagrama de *Shields*, representado na Figura 15. Acima da curva ilustrada, que representa as tensões críticas de arraste, verifica-se a região de ocorrência do transporte de sólidos e abaixo da curva a região de ausência de movimento.



Fonte: Adaptado de Julien (2010, p.88)

No diagrama de *Shields* reconhecem-se três regiões distintas (BAPTISTA & LARA, 2010):

- ⟨ $Re_* \leq 2$: diz respeito ao escoamento hidraulicamente liso, em que os diâmetros das partículas são muito menores do que a subcamada viscosa. Com isso, τ_* não é dependente do diâmetro do grão;
- ⟨ $Re_* \geq 500$: refere-se ao escoamento hidraulicamente rugoso, em que a subcamada viscosa não existe e τ_* é independente da viscosidade do fluido. Diante disso, τ_* pode ser considerado praticamente constante, correspondendo a 0,06;
- ⟨ $2 < Re_* < 500$: relativo à transição entre as situações anteriores, em que os diâmetros dos grãos possuem a mesma ordem de grandeza da espessura da camada laminar, sendo o valor de τ_* superior a 0,032.

Salienta-se que tanto os experimentos de Hjulstrøm e Shields foram realizados com a utilização de sedimentos de leito bem selecionados e de um único tamanho. Com isso,

destaca-se que essa condição não é representativa para muitos canais, nos quais existe uma diversidade de tamanhos nos grãos. A disposição dos grãos no leito, bem como a variedade de tamanho dos grãos, afeta de forma significativa a maneira como ocorre o arraste de grãos de forma individual e as taxas gerais de transporte dos sedimentos (CHARLTON, 2008).

3.4.4 Quantificação do Transporte de Sedimentos

Existem, de forma básica, uma divisão baseada em três tipos de formulações para a estimativa da descarga sólida, a saber: (i) descarga sólida do leito, (ii) descarga sólida em suspensão e (iii) descarga sólida total, sendo esta última determinada com base no somatório da descarga sólida do leito com a descarga sólida em suspensão (BRAGA, 2022).

O cálculo da carga sólida em suspensão e a do leito são realizadas de forma independente pois não são regidas completamente pelas mesmas leis. O sedimento em suspensão movimenta-se livremente pela ação da corrente, ao passo que o sedimento do leito sofre ações de resistência entre as próprias partículas e interferências do próprio leito, fazendo deste um fenômeno mais complexo (CARVALHO, 2008).

Diante desta complexidade, destaca-se que os desenvolvimentos teóricos das funções de transporte de sedimentos para diferentes condições de fluxo foram baseados em suposições, algumas simplificadas e baseadas em condições laboratoriais idealizadas, que podem não ser verdadeiras em sistemas fluviais naturais. Além disso, muitas soluções teóricas exigem parâmetros difíceis ou impossíveis de serem obtidos na maioria dos rios naturais. Salienta-se, com isso, que existem várias equações para a estimativa da capacidade de transporte de sedimentos considerando diferentes cargas, mas no entanto, não existe uma equação universal passível de aplicação a todas as condições de fluxo e sedimentos. Em função da seleção da equação de transporte os resultados simulados e previstos de um determinado modelo podem variar significativamente entre si e com relação aos dados observados (SUMMER & WALLING, 2002).

3.4.4.1 Transporte da carga de fundo

Quando os parâmetros hidráulicos em um canal com material solto sejam tais que uma pequena alteração de um dos constituintes fará com que a condição crítica do leito seja ultrapassada e o movimento das partículas arrastadas seja de rolar, deslizar e, às vezes, saltar, sendo este movimento próximo ao leito do canal, têm-se o denominado transporte da carga de fundo (GRAF, 2010).

Destaca-se que a descarga sólida de arrasto representa apenas a menor parte da descarga sólida total, normalmente correspondente a 5 a 10% conforme apontado por Carvalho (2008). O autor ressalta, entretanto, que em caso de rios largos e rasos com sedimento aluvionar, esse valor percentual pode igualar ou superar o valor da descarga em suspensão.

As equações para a carga de fundo envolvem a descarga total de sedimento grosso até areias ($D > 0,062$ mm). Para a determinação da descarga sólida total devem ser conhecidas a concentração e a curva granulométrica do sedimento em suspensão para se determinar a porcentagem de material fino (CARVALHO 2008).

A Tabela 5 apresenta algumas correlações empíricas e semiempíricas que podem ser utilizadas como referência para a determinação do transporte da carga de leito. Cordeiro (2022) destaca que, como consequência do grande número de equações de transporte de sedimentos atualmente existentes, um dos grandes desafios do usuário reside em selecionar aquela mais confiável e adequada às condições físicas analisadas.

Tabela 5 – Equações para a determinação do transporte de carga no leito

Referência	Equação	Faixa de aplicação	Observações
Du Boys (1879)	$q_s = \lambda \tau_0 (\tau_0 - (\tau_0)_c)$ $\lambda = \frac{0,54}{(\rho_s - \rho)g}$		λ denominado coeficiente característico do sedimento
	Schoklitsch (1914)		Experimentos de laboratório com grãos uniformes de vários tipos de areia e porcelana
	$\lambda \propto d^{-\frac{3}{4}}$ Straub (1935)	0,125 < d < 4 mm	Baseado em dados de laboratório
Schoklitsch (1930)	$q_s = \lambda' (\text{sen } \theta)^k (q - q_c)$ $q_c = 1,944 \times 10^2 d (\text{sen } \theta)^{-\frac{4}{3}}$	0,305 < d < 7,02 mm	Baseado em experimentos de laboratório
Shields (1936)	$\frac{q_s}{q} = 10 \frac{\text{sen } \theta}{s} \frac{\tau_0 - (\tau_0)_c}{\rho g (s - 1) d_s}$	1,06 < s < 4,25 1,56 < d < 2,47 mm	
Einstein (1942)	$\frac{q_s}{\sqrt{(s - 1)g d^3}} = 2,15 \exp \left(-0,391 \frac{\rho (s - 1) g d_s}{\tau_0} \right)$	$\frac{q_s}{\sqrt{(s - 1)g d_s^3}} < 0,4$ 1,25 < s < 4,25 0,315 < d < 28,6 mm	Experiências de laboratório. Equação fraca de transporte de sedimentos para misturas de areia. Nota: $d_s \approx d_{35}$ a d_{45}
Meyer – Peter (1949, 1951)	$\frac{m_q^{\frac{2}{3}} \text{sen } \theta}{d} - 9,57 (\rho g (s - 1))^{\frac{10}{9}}$ $= 0,462 (s - 1) \frac{(\rho g (m_s)^2)^{\frac{2}{3}}}{d}$	1,25 < s < 4,2	Experiências de laboratório. Distribuição uniforme do tamanho de grão
	$\frac{q_s}{\sqrt{(s - 1)g d^3}} = \left(\frac{4 \tau_0}{\rho (s - 1) g d} - 0,188 \right)^{\frac{3}{2}}$		Experiências de laboratório. Misturas de partículas. Nota: $d_s \approx d_{50}$
Einstein (1950)	Uso de gráficos $\frac{q_s}{\sqrt{(s - 1)g d_s^3}} = f \left(\frac{\rho (s - 1) g d_s}{\tau_0} \right)$	$\frac{q_s}{\sqrt{(s - 1)g d_s^3}} < 10$ 1,25 < s < 4,25 0,315 < d < 28,6 mm	Experiências de laboratório. Para misturas de areia. Nota: $d_s \approx d_{35}$ a d_{45}
Schoklitsch (1950)	$m_s = 2500 (\text{sen } \theta)^{\frac{3}{2}} (q - q_c)$ $q_c = 0,26 (s - 1)^{\frac{5}{3}} d_{40}^{\frac{3}{2}} (\text{sen } \theta)^{-\frac{7}{6}}$		Baseado em experimentos de laboratório e medições de campo (rios Danúbio e Aare)
Nielsen (1992)	$\frac{q_s}{\sqrt{(s - 1)g d^3}} = \left(\frac{12 \tau_0}{\rho (s - 1) g d} - 0,05 \right) \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho (s - 1) g d}}$	1,25 < s < 4,22 0,69 < d < 28,7 mm	Reanálise de dados laboratoriais

Nota: m_q = vazão da água por unidade de largura; m_s = vazão do sedimento por unidade de largura; q = descarga volumétrica de água; q_s = descarga volumétrica de sedimentos por unidade de largura; s = densidade relativa do sedimento ($s = \rho_s/\rho$); d = diâmetro do sedimento, em metros; $(\tau_0)_c$ = tensão crítica de cisalhamento do leito.

Fonte: Chanson (2004, p. 191-192)

3.4.4.2 Transporte de sedimentos em suspensão

As partículas em suspensão são aquelas que movem-se cercadas pelo fluido (GRAF, 2010). Carvalho (2008) destaca que a maior parte da carga sólida de um curso d'água corresponde a carga em suspensão, normalmente em valores que variam de 80 a 90%. No entanto, o autor menciona que, a depender do curso d'água em questão, bem como da posição da seção avaliada, essa carga em suspensão é bastante variável, sendo função da velocidade, tipo de escoamento, profundidade e granulometria, por exemplo.

Um exemplo para a estimativa da descarga sólida em suspensão pode ser feita pela seguinte equação (CARVALHO, 2008):

$$Q_{ss} = 0,0864 Q C \quad (2)$$

Na qual: Q_{ss} é a descarga sólida em suspensão ($t d^{-1}$); Q é a descarga líquida ($m^3 s^{-1}$) e C é a concentração ($mg l^{-1}$).

Destaca-se que a temperatura é capaz de exercer variações nas concentrações de sedimentos finos em suspensão. Em águas de temperaturas mais frias é observado um aumento da concentração de finos em função de uma diminuição da viscosidade (CARVALHO, 2008).

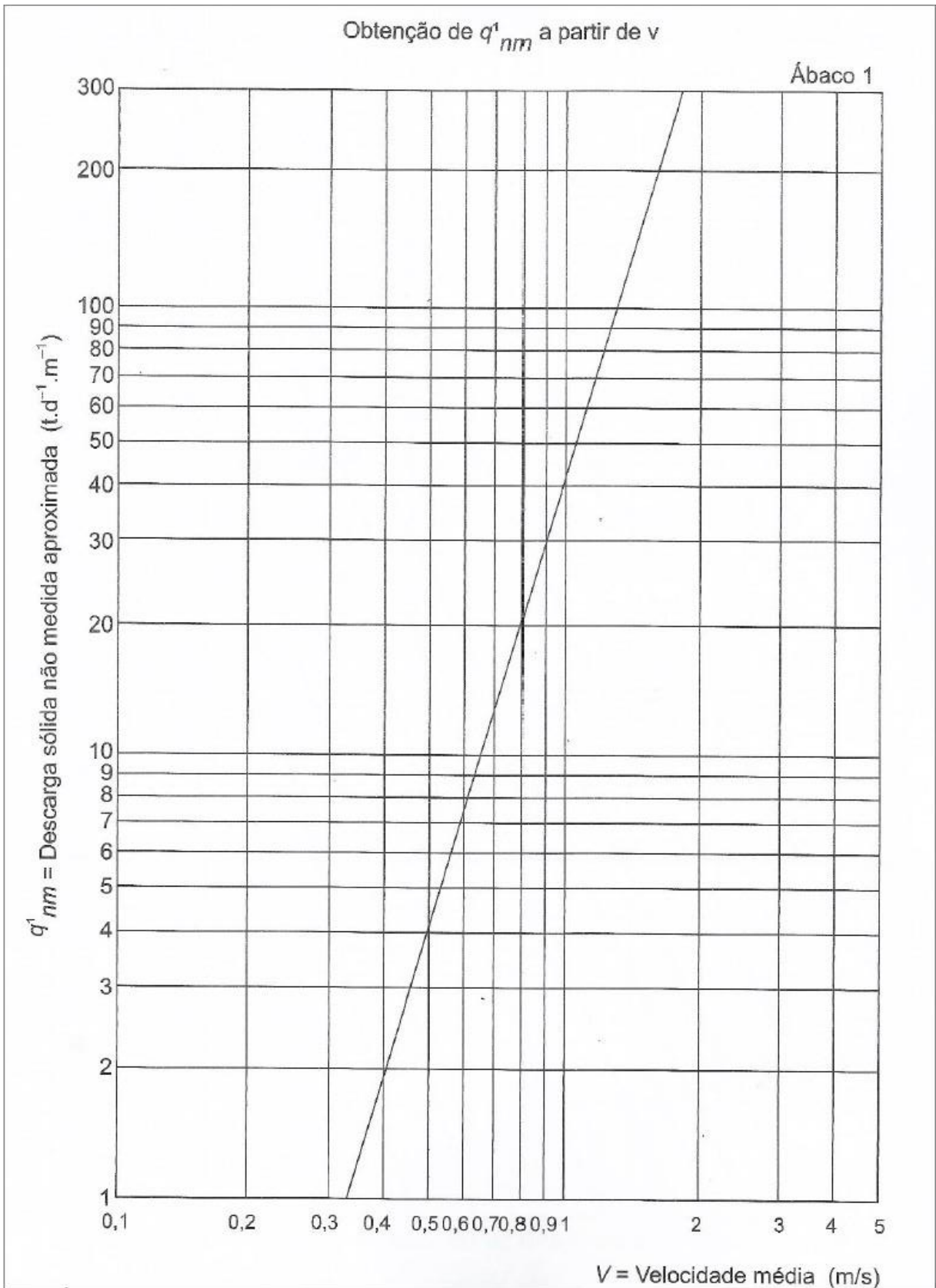
3.4.4.3 Carga total de sedimentos

Conforme mencionado, a carga total de sedimentos corresponde a uma soma entre as cargas de fundo e em suspensão. A seguir é apresentado um exemplo de metodologia desenvolvida para essa aplicação.

Descarga sólida total pelo método de Colby (1957)

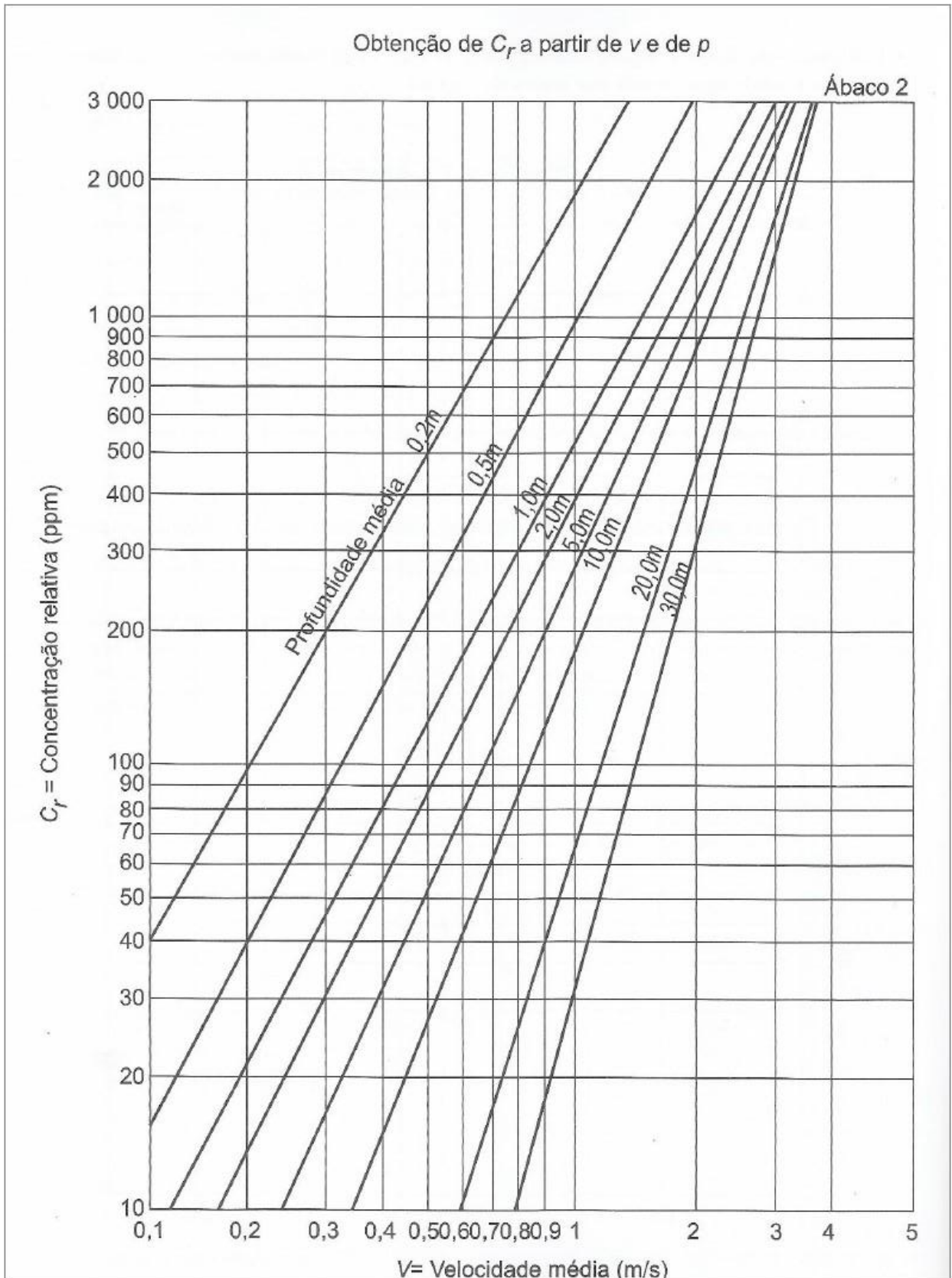
Para determinação da vazão sólida total de cursos hídricos o método simplificado proposto por Colby (1957) se baseia em três ábacos e dados de descarga líquida, profundidade média, largura da seção, velocidade média e concentração medida de sedimentos em suspensão. Os gráficos de Colby são apresentados por Carvalho (2008) no sistema métrico.

Figura 16 - Ábaco para cálculo da descarga sólida total pelo método de Colby simplificado. É a obtenção da descarga sólida não-medida aproximada, por metro de largura do curso hídrico, a partir de q_{nm} a partir de v .



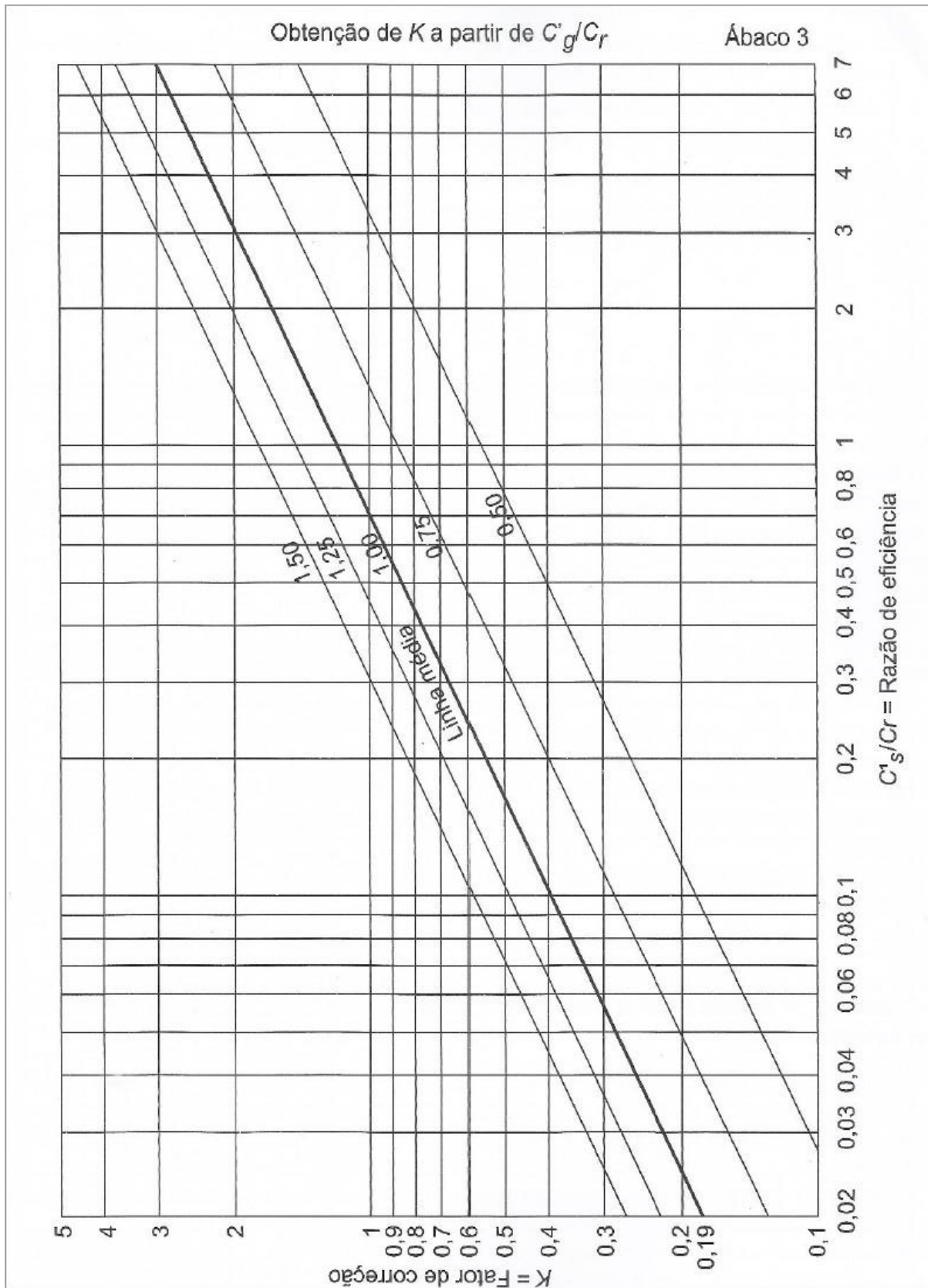
Fonte: Carvalho (2008, p.279)

Figura 17 - Ábaco 2 para cálculo da descarga sólida total pelo método de Colby simplificado. É obtenção da concentração relativa a partir da velocidade média e da profundidade média do



Fonte: Carvalho (2008, p.280)

Figura 18 - Ábaco 3 para cálculo da descarga sólida total pelo método simplificado de Colby e obtenção do fator de correção a partir da razão de eficiência



Fonte: Carvalho (2008, p.281)

A carga sólida total é calculada a partir das seguintes expressões (CARVALHO, 2008):

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (3)$$

Sendo:

$$Q_{sm} = 0,0864 Q C'_s \quad (4)$$

$$Q_{nm} = q'_{nm} K L \quad (5)$$

Na qual: Q_{st} é a descarga sólida total ($t.d^{-1}$); Q_{sm} é a descarga medida ($t.d^{-1}$); Q_{nm} é a descarga não medida ($t.d^{-1}$); Q é a descarga líquida ($m^3.s^{-1}$); C'_s é a concentração medida (ppm); L é a largura do rio (m) e K é o fator de correção.

3.4.5 Transporte de Sedimentos nos Estudos de Ruptura Hipotética

Na literatura observa-se a existência de diferentes estudos que buscam avaliar os impactos decorrentes da ruptura de barragens, empenhando-se em contribuir para um maior entendimento das principais variáveis envolvidas no desenvolvimento destes estudos e auxiliar na determinação de orientações que embasem as avaliações realizadas. Todavia, embora forneçam referências sobre estudos de ruptura hipotética de barragens, não foram encontradas diretrizes relativas ao transporte de sedimentos dentro dessas avaliações.

Para rupturas envolvendo barragens de água são encontrados critérios mais consolidados, como é o caso dos manuais da empresa Eletrobras e da Agência Nacional de Águas, bem como diversos estudos desenvolvidos para estas barragens (e.g. Palmier *et al.*, 2007; Lauriano *et al.*, 2008; Lauriano, 2009; Vianini Neto, 2016). Observa-se que muitos estudos desenvolvidos para a ruptura de barragens de rejeitos se fundamentam na avaliação de casos reais de ruptura observados na busca de calibrar e/ou validar os resultados a partir da comparação com as manchas observadas, bem como as informações coletadas sobre o evento (e.g. Machado, 2017; Matos, 2018; Almeida, 2019; Brandão, 2019; Silva, 2020).

Recentemente alguns estudos foram desenvolvidos com intuito de avaliação do impacto do transporte de sedimentos após a ocorrência de rupturas de barragens de rejeito, como é o caso de Palu & Julien (2019), que buscaram avaliar a carga de sedimentos no Rio Doce após o rompimento da Barragem de Fundão, e Salles (2019)

e Andrade *et al.* (2019) cuja avaliação se concentrou no Rio Paraopeba após a ruptura da Barragem B-I em Brumadinho. Tais estudos, entretanto, não possuem como foco a avaliação do impacto da inserção do transporte de sedimentos como uma variável de entrada no estudo de ruptura hipotética ou *Dam Break*.

O que se observa é que alterações na bacia hidrográfica afetam diretamente os aspectos físico-químicos e também os processos biológicos nos talvegues e/ou cursos de água, potenciando a geração e o transporte de sedimentos e causando variações na temperatura e nos demais parâmetros da água, uma vez que o equilíbrio morfodinâmico das calhas fluviais está associado à interação entre as descargas líquida e sólida, à geometria e à declividade do curso de água. As mudanças que são observadas no ecossistema local, caso superem àquelas inerentes aos processos naturais, alteram o equilíbrio dinâmico de forma que, em alguns casos, ele possa ser perdido e uma nova situação de harmonia se desenvolva (SILVA *et al.* 2016).

Os rejeitos de uma barragem se deslocam com a dinâmica de movimentos de massa, como é o caso do fluxo de detritos ou lamas, sendo dependente das características do material (sólido ou líquido), bem como das características do relevo local. Dessa forma, o que se observa é que o depósito dos rejeitos nas margens fluviais não é um depósito típico de planície, tanto a dinâmica do processo quanto a seleção do material. Antes de ocorrer a acomodação dos rejeitos, o fluxo remove a camada superficial do solo, de forma que seja observada uma mistura do material original com aquele deslocado, para, somente então, promover o depósito (FELIPPE & MENDES, 2022).

Para que ocorra a mobilização completa de todo esse material até os oceanos, salienta-se ainda que será necessário um tempo indefinido, condicionado ao volume das chuvas, as principais responsáveis pelo transporte do material depositado nas margens para os rios. Isso destaca ainda mais a relevância de que sejam realizados estudos que busquem avaliar a disposição dos rejeitos ao longo das margens dos canais atingidos, com intuito de entender aspectos relacionados tanto aos locais com maior propensão a disposição, quanto o comportamento desses materiais no sistema fluvial (FELIPPE & MENDES, 2022).

No que diz respeito aos aspectos legais, embora até o primeiro semestre de 2022 não existam indicações específicas que detalhem as avaliações supracitadas, destaca-se

que a Resolução Nº 95, de fevereiro de 2022, mais recente no que tange aos sobre aspectos de segurança de barragens no território nacional, indica que para a elaboração dos mapas de inundação, além das áreas inundadas, com destaque para a ZAS e ZSS, devem ser indicados os tempos de viagem para os picos da frente de onda e inundações em locais críticos e deve-se prever possíveis impactos ambientais.

Na avaliação de um cenário de ruptura hipotética com a incorporação do transporte de sedimentos, espera-se a promoção de uma maior dissipação da energia adquirida pela onda proveniente da ruptura ao longo da propagação do escoamento, uma vez que os rejeitos vão se depositar conforme a massa específica dos grãos e distribuição granulométrica. Dessa forma, a propagação do fluido composto apresentaria um amortecimento maior do que uma onda composta apenas por água, já que o volume vai ficando retido ao longo da calha. Com isso, espera-se uma alteração dos tempos de picos relacionados.

Além disso, após a ocorrência da ruptura da Barragem de Fundão, foram observadas situações de comprometimento de abastecimento de água em várias cidades ao longo do rio Doce. Com o maior entendimento da ocorrência das zonas de erosão e depósito ao longo do curso de água afetado por uma eventual ruptura, a partir da identificação de todos os pontos de interesse dentro da área afetada, que incluem as estações de captação de água para abastecimento urbano, passe-se a dispor de maiores instrumentos que possibilitem não apenas a realização de planos de emergências (PAEBM), mas a atuação direta nas contingências (remediações) pós emergência e com isso minimização dos impactos sentidos pela população.

A partir de todos os pontos levantados reforça-se a importância de que sejam realizados esforços no sentido de mensurar os impactos da incorporação do transporte de sedimentos na modelagem hidrodinâmica, buscando quantificar diferenças dessa incorporação na simulação de ruptura de barragens, aproximando ainda mais os modelos simulados dos eventos reais observados. Conforme destacado por Machado (2017), a realização de trabalhos de retroanálise constituem uma importante ferramenta para conhecimento e análise de fenômenos ocorridos, possibilitando a avaliação e aperfeiçoamento de modelos e metodologias utilizadas na previsão destes fenômenos.

3.5 Abordagens Hidráulicas

Uma etapa fundamental para a realização dos estudos de ruptura hipotética ou *Dam Break* consiste na realização da propagação hidráulica da onda de ruptura pelo vale a jusante, sendo indicado por Zhang *et al.* (2016) os princípios da hidráulica fluvial como base para o desenvolvimento dessa propagação. Os autores apontam que as equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível constituem o núcleo para a maior parte das simulações computacionais de propagação de fluxos instáveis.

As equações de Navier-Stokes, segundo Doering & Gibbon (2004), são uma formulação das leis do movimento de Newton para uma distribuição contínua da matéria no estado fluido, sendo caracterizada por uma incapacidade de suportar tensões de cisalhamento. Trata-se, conforme indicado pelos autores, de um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares, cuja finalidade reside na descrição do movimento de fluidos laminares a turbulentos, nas mais diferentes escalas.

A partir das equações de movimento e continuidade, seguem apresentadas as equações de Navier-Stokes para o escoamento incompressível e escoamento permanente (WHITE, 2011):

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt} \quad (6)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt} \quad (8)$$

Na qual: ρ é a densidade do fluido; x, y, z são as coordenadas cartesianas; t é o tempo; u, v, w são as componentes de velocidade nas direções x, y e z , respectivamente; p é a pressão, μ é a viscosidade e g é a aceleração gravitacional.

Salienta-se que as equações completas de Navier-Stokes descrevem o comportamento tridimensional (3D) do escoamento de um fluido, sendo empregadas simplificações nestas equações de forma a representar o comportamento uni ou bidimensional (1D e 2D, respectivamente). Doering & Gibbon (2004) destacam que apenas em exemplos mais simples, como é o caso geralmente de fluxos laminares,

as equações são exatamente solúveis, não sendo esta, entretanto, uma barreira fundamental. Os autores ressaltam que em muitas aplicações importantes, como é o caso da turbulência, usualmente são realizadas simplificações analíticas ou numéricas para extrair as previsões desejadas, sendo a realização de aproximações adequadas, em geral, de igual ou maior utilidade do que um resultado exato complicado.

Um exemplo de aplicação bidimensional (2D) para a realização da modelagem simplificada da propagação do escoamento é o caso da equação de Águas Rasas (*Shallow Water Equation – SWE*). Parte-se da suposição de que a escala de comprimento vertical (profundidade) é muito menor do que as escalas de comprimento horizontal (largura/extensão). Dessa forma, como consequência, a velocidade vertical é pequena e admite-se que a pressão é hidrostática, tornando-se possível se desconsiderar os termos de aceleração vertical do escoamento. As equações de Águas Rasas encontram-se representadas a seguir, sendo a primeira relativa a conservação da massa e as demais a conservação da quantidade de movimento (USACE, 2021b).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_c v \\ = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,x}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f_c u \\ = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{t,xx} h \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{t,yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{b,y}}{\rho R} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho h} \end{aligned} \quad (11)$$

Na qual: x, y são as coordenadas cartesianas; t é o tempo; u, v são as componentes de velocidade nas direções x e y ; h é a profundidade do escoamento; q é o termo de fluxo entradas/saídas; g é a aceleração gravitacional; z_s é a elevação da superfície de água; $v_{t,xx}, v_{t,yy}$ são coeficientes de viscosidade; $\tau_{b,x}, \tau_{b,y}$ relativos a tensão de

cisalhamento; $\tau_{s,x}$, $\tau_{s,y}$ relativo a tensão do contato fluido e ar na superfície; R é o raio hidráulico e f_c é o parâmetro de *Coriolis*.

Ainda tratando-se de avaliações bidimensionais, destaca-se que uma abordagem simplificada para a modelagem da propagação do escoamento consiste na aplicação da equação de Onda Difusiva (*Diffusion Wave*), que corresponde a uma redução da equação de Águas Rasas (*Shallow Water*). Nesta equação o termo gradiente de pressão barotrópico (gravidade) e os termos de atrito de fundo são os termos dominantes nas equações de quantidade de movimento e os termos advecção, viscosidade e aceleração variada podem ser desconsiderados (USACE, 2021b).

Em relação à representação do escoamento unidimensional (1D), Silva (2021) destaca a utilização do modelo matemático proposto por Saint-Venant, que admite a distribuição de velocidades apenas no sentido do fluxo. Conforme destaca o autor, este modelo também corresponde a uma simplificação das equações de Navier-Stokes, podendo ser empregado na simulação da propagação hidráulica dos hidrogramas provenientes da ruptura de barragens.

Uma outra etapa fundamental na modelagem da propagação hidráulica da onda de ruptura pelo vale a jusante consiste na determinação do teor de sólidos (ou concentração volumétrica) do fluido composto pelo rejeito e água existente no reservatório. Usualmente as barragens de rejeito, conforme pontuado por Rocha (2015), apresentam fluidos hiperconcentrados, ou seja, possuem uma grande concentração de sólidos em suspensão.

Na Tabela 6 encontra-se indicada a caracterização do escoamento em função da concentração volumétrica (C_v), conforme proposição de O'Brien & Julien (1985). Segundo indicação dos autores, escoamentos de materiais que apresentam uma concentração volumétrica abaixo de 20% são em essência aquosos. O chamado de *mud flood* possui propriedades diferentes do fluido aquoso, como maior viscosidade e massa específica, sendo a faixa de variação de sua concentração volumétrica entre 20% e 45%. O *mud flow* apresenta uma concentração volumétrica na faixa de 45% a 55%, possuindo alta viscosidade e baixas velocidades de escoamento. Cabe salientar

que os limites indicados são orientativos e variam (ainda que pouco) conforme o fluido e o sedimento transportado.

Tabela 6 É Caracterização do escoamento em função da concentração de sólidos

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

Fonte: Adaptado de O'Brien & Julien (1985)

É importante ressaltar que um único evento pode produzir diferentes tipos de fluxo em momentos e locais diferentes ao longo do curso de água (USGS, 2005). Rocha (2015) reforça que, após a definição do tipo de escoamento previsto, é fundamental a escolha adequada de um modelo hidráulico para a simulação.

3.5.1 HEC-RAS

O programa HEC-RAS na versão 6.1 foi o modelo numérico empregado neste trabalho. Dessa forma, neste item serão apresentados os principais aspectos relativos ao *software*.

O HEC-RAS é um *software* desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (CEIWR-HEC) do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 2021b). Trata-se de um *software* de livre acesso, mas que constantemente é atualizado e incorpora melhorias, além de amplamente testado e validado ao longo de décadas de utilização em nível mundial.

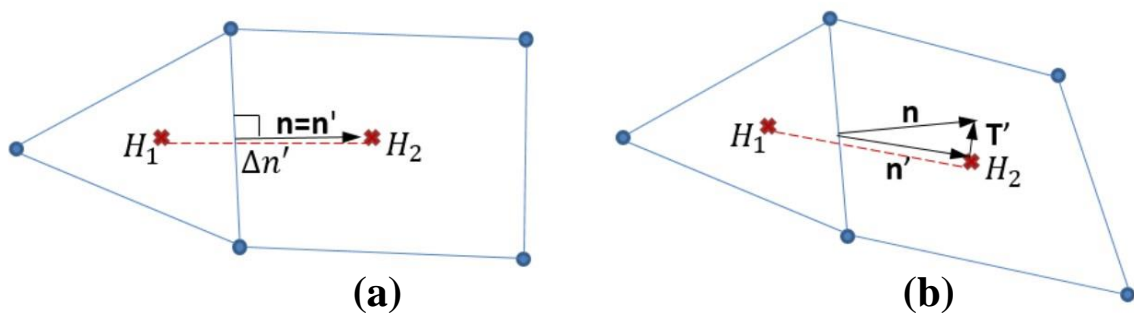
A utilização deste *software* permite que o usuário execute cálculos de fluxo de forma uni e bidimensional em regime permanente ou variado, cálculos de transporte de sedimentos/leito móvel, bem como modelos relacionados à qualidade da água (USACE, 2021b). Salienta-se que recentemente, em sua atualização para a versão 6.0, o *software* incorporou a simulação de fluidos não-newtonianos, representando um grande avanço em relação as versões anteriores, nas quais para a realização das simulações de ruptura hipotética aproximava-se o comportamento do fluido hiperconcentrado pelo pseudo-Manning, conforme mencionado, por exemplo, por Rocha (2015) e Machado (2017). Entre as melhorias recentes do programa, encontra-se ainda a inserção da modelagem do transporte de sedimentos bidimensional, possibilitando sua utilização no contexto proposto para o presente trabalho. A opção pela utilização do *software* em sua versão 6.1 se baseou no fato de que esta versão constitui o lançamento oficial desta nova funcionalidade de Transporte de Sedimentos 2D, ferramenta base para o desenvolvimentos das simulações propostas.

Destaca-se que o *software* foi projetado para usar malhas não estruturadas, no entanto, consegue lidar com malhas estruturadas. A malha estruturada é tratada da mesma forma que a malha não estruturada, com exceção do fato de que o sistema se aproveita de que as células são ortogonais, facilitando, assim, os cálculos computacionais. Isso significa que as células podem ser representadas por triângulos, quadrados, retângulos, ou até elementos com seis, sete e, no máximo, oito lados, em uma mesma malha. O contorno da malha computacional é definido com um polígono, que pode ser importado de um arquivo *shapefile*. Embora a malha computacional não precise ser ortogonal, essa configuração torna a discretização computacional simplificada e mais eficiente (BRANDÃO, 2019).

O HEC-RAS utiliza a solução de Navier-Stokes com base nas equações de Águas Rasas (*Shallow Water*), descrita em detalhes anteriormente (Eqs. 9 a 11),

apresentando um método de discretização híbrida que combina diferenças finitas e volumes finitos para solução destas equações. Nos casos nos quais existe ortogonalidade entre duas células, conforme apresentado no esquema a) da Figura 19, o método numérico de diferenças finitas é suficiente para solução e determinação da superfície de água nas células. Já no caso nos quais as células não são ortogonais, como visto no esquema b) da Figura 19, com direção n diferente da direção n' , a solução ocorre por meio da mescla de métodos de diferenças finitas e de volumes finitos (USACE, 2016).

Figura 19 Direções das células da grade: a) ortogonal, b) não ortogonal



Fonte: USACE (2016)

O HEC-RAS apresenta também equacionamento aplicável especificamente a casos nos quais a modelagem, apresenta os termos de gravidade e atrito do fundo do canal como dominantes do comportamento do escoamento, de tal forma que, conforme mencionado anteriormente, equação de momento pode ser simplificada com a desconsideração dos termos de advecção, viscosidade e aceleração variada no equacionamento denominado Onda Difusiva (*Diffusion Wave*) que, na sua forma vetorial, é representado por (USACE, 2021b):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \left(\frac{R^{2/3} h}{n |\nabla z_s|^{1/2}} \nabla z_s \right) + q \quad (12)$$

Na qual: ∇z_s corresponde ao gradiente de elevação da superfície de água e n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Em relação ao intervalo de tempo computacional, salienta-se que o *software* se baseia na solução das equações de Saint-Venant, visando o alcance da estabilidade do

modelo, com base na condição de *Courant*. Esta é apresentada a seguir (USACE, 2016):

$$C = \frac{V_w \Delta T}{\Delta X} < 1 \quad (13)$$

Na qual: C é o número de *Courant*, V_w é a velocidade da onda de inundação; ΔT é o intervalo computacional e ΔX é a dimensão média da célula.

O HEC-RAS apresenta ainda uma interface com a plataforma GIS, sendo o RAS *Mapper* um extenso sistema de mapeamento e integração de dados espaciais (USACE, 2021b). Conforme destacado por Vianini Neto (2016), a interface do RAS *Mapper* possibilita, através da visualização geoespacial, uma análise facilitada dos resultados das simulações realizadas em conjunto com a base de dados geométricos, procedimento, este, que auxilia na identificação de eventuais deficiências do modelo hidráulico.

No que tange às novas funcionalidades, destaca-se o módulo *Mud and Debris* no HEC-RAS utiliza o *DebrisLib* (Floyd *et al.*, 2019) para contabilizar as perdas internas que afetam esses fluxos de alta concentração e aplica modelos não-newtonianos no HEC-RAS. Há uma variedade de abordagens para a simulação de fluidos não-newtonianos, incluindo abordagens monofásicas e multifásicas. Os recursos atuais no HEC-RAS usam abordagens de fase única, que modelam o comportamento do fluido com modelos reológicos (ou seja, relações tensão-deformação) (USACE, 2020b).

O funcionamento básico se fundamenta na inserção de um termo de declividade à linha de energia adimensional na equação de momento newtoniana no HEC-RAS para, assim, incorporar as perdas causadas por um fluido não-newtoniano. Trata-se de um artifício matemático que permite importar a teoria reológica para a equação da quantidade de movimento, pois pode-se conectar esse termo ao comportamento esperado de tensão-deformação de diferentes materiais (USACE, 2020b).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f + S_{MD} \right) = 0 \quad (14)$$

Na qual: S_f representa declividades da linha de energia; S_{MD} representa a declividade equivalente para lamas e detritos.

Dentre as novas funcionalidades destaca-se, por fim, o módulo de simulação do transporte de sedimentos horizontal bidimensional (2D) instável e mudança de leito, que incorpora a possibilidade de classificação e camadas. O transporte de sedimentos é calculado com uma formulação de carga total de não equilíbrio, sendo esta resolvida com métodos implícitos de volume finito na mesma malha poligonal não estruturada que o *solver* de fluxo. O transporte de sedimentos é acoplado ao modelo de fluxo no nível do passo de tempo (USACE, 2020a).

3.5.2 Avaliação dos Modelos Hidráulicos

Uma etapa fundamental da elaboração do presente estudo reside na avaliação e validação dos resultados obtidos, com especial foco em compreender os efeitos da incorporação do transporte de sedimentos ao longo da onda de ruptura obtida. Uma alternativa para essa avaliação consiste na utilização de análise visual para comparação entre a mancha observada e as manchas obtidas a partir das modelagens numéricas. No entanto, conforme destacado por Rocha (2015), embora a análise represente uma ferramenta importante, em especial para modeladores experientes, essa análise é de difícil aplicação e resulta em avaliações subjetivas do desempenho do modelo.

Como alternativa o autor destaca a utilização de medidas quantitativas que possibilitam uma avaliação objetiva para o desempenho do modelo, destacando como opção mais comum a utilização da análise pixel-a-pixel, ou comparação binária. A avaliação engloba todas as células da área analisada, para as quais são criados quatro conjuntos (Tabela 7).

Tabela 7 Conjuntos de possibilidades de Combinações para a utilização da comparação binária

	Presente na observação	Ausente na observação
Presente no modelo	A	B
Ausente no modelo	C	D

Fonte: Rocha (2015)

A Tabela 8 foi adaptada por Rocha (2015 *apud* Stephens *et al.*, 2014) e nela são apresentadas algumas medidas binárias de desempenho para estudos de inundação. Sua compilação foi realizada a partir dos estudos de Hunter (2005) e Schumann *et al.* (2009).

Tabela 8 Índices de desempenho binários para utilização em estudos de inundação

Nome	Equação	Intervalo	Comentário
Viés	$\frac{A + B}{A + C}$	$(0, \infty)$ – Igual a 1 para previsão correta	Balço entre sub e superestimativa inundação
F2 - Índice de Sucesso Crítico	$\frac{A}{A + B + C}$	$(0, 1)$	Ajuste do F1 para reduzir a influência do tamanho da área não inundada no domínio
F3	$\frac{A - C}{A + B + C}$	$(-1, 1)$	Desenvolvido para penalizar a subestimativa da cheia
F4	$\frac{A - B}{A + B + C}$	$(-1, 1)$	Desenvolvido para penalizar a superestimativa da cheia

Fonte: Adaptado de Rocha (2015)

Além da análise com base nessa abordagem de comparação binária com cálculo dos índices de desempenho F, destaca-se que adicionalmente serão avaliadas algumas seções de interesse ao longo da mancha de inundação a jusante, nas quais serão comparados aspectos como o tempo de chegada da onda, decaimento das vazões de pico e propagação dos hidrogramas, velocidades e profundidades máximas.

4 A BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE FUNDÃO

A Barragem de Fundão, integrante do Complexo Germano da Mineradora Samarco, localizado no município de Mariana (MG), possuía a função de contenção de rejeitos. A jusante encontra-se localizada a Barragem Santarém, cuja finalidade é a contenção dos sedimentos carreados para o córrego a jusante e a captação de água (MACHADO, 2017).

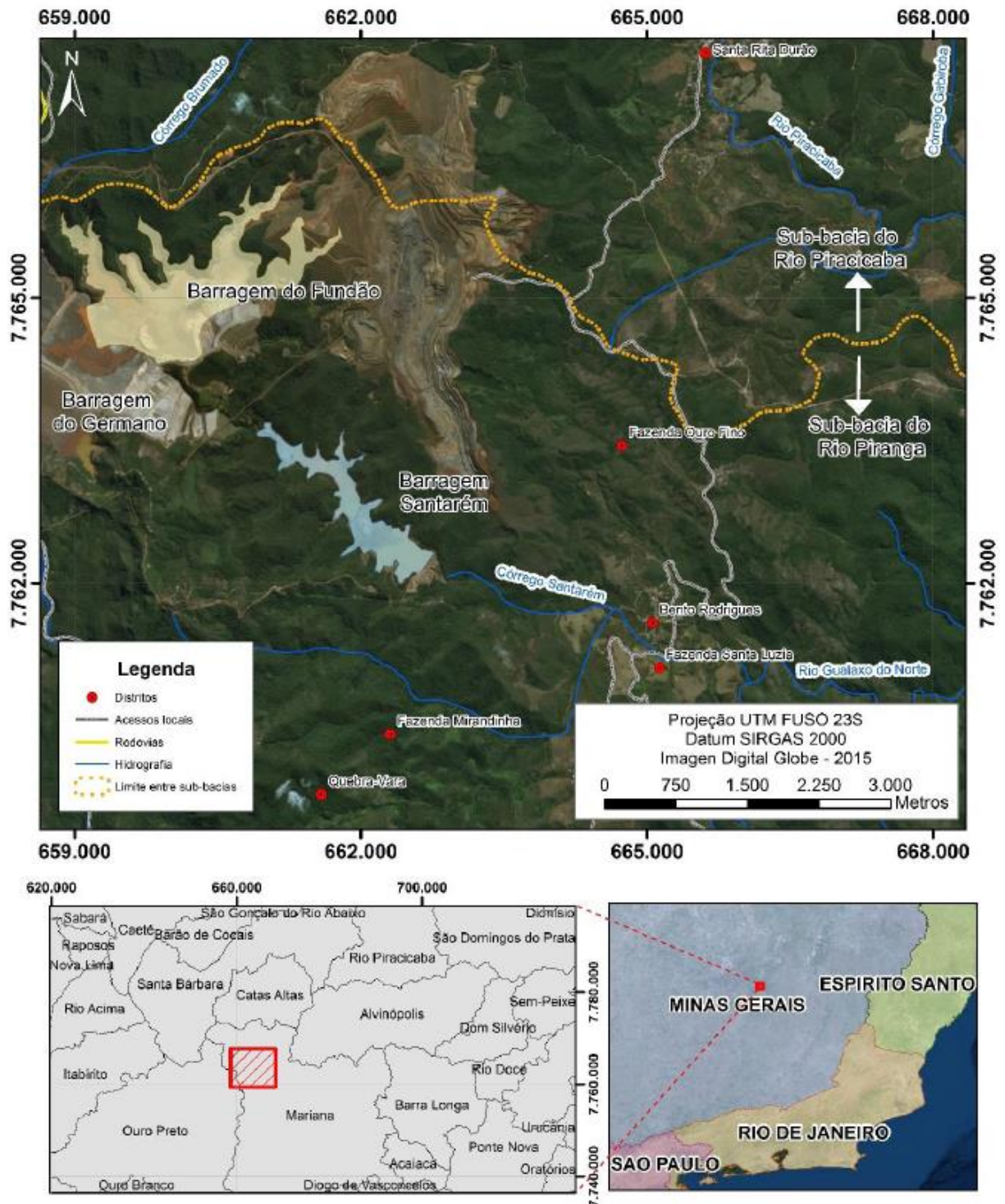
A ruptura da Barragem de Fundão aconteceu na tarde do dia 05 de novembro de 2015. O acidente causou 19 mortes, entre os membros da comunidade e empregados da Samarco, além de incontáveis danos ambientais que se estenderam até a foz do rio Doce (Regência – ES) e a destruição do subdistrito de Bento Rodrigues (MG), localizado a cerca de 8 km a jusante da Barragem de Fundão.

A Barragem de Fundão mantinha um volume de rejeitos de aproximadamente 55 milhões de m³, dos quais cerca de 32,6 milhões de m³ (aproximadamente 60%), teria se propagado, segundo dados divulgados pela Samarco em seu site oficial. O rompimento de Fundão ocasionou o galgamento da Barragem Santarém, que não rompeu e acabou retendo grande parte dos sedimentos (SAMARCO, 2021).

Morgenstern *et al.* (2016) concluíram que a falha se iniciou na ombreira esquerda da barragem, sendo o motivo da ocorrência da falha a liquefação, que fez com que ocorresse a transformação abrupta do material de um sólido para líquido.

A Figura 20 apresenta os aspectos gerais do empreendimento e do entorno da barragem analisada.

Figura 20 É Localização da Barragem de Fundão É Aspectos Gerais do Entorno

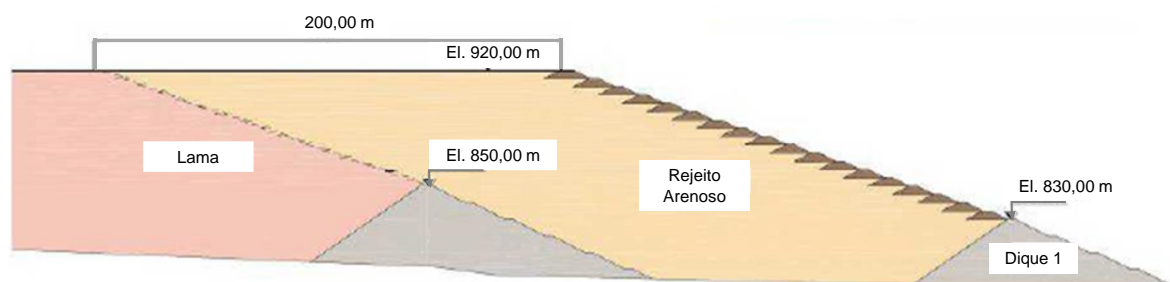


Fonte: Machado (2017)

Segundo Brandt (2005) *apud* Machado (2017), de uma maneira geral, a disposição de rejeitos no Complexo Germano ocorria através da separação do rejeito em arenoso e fino (lama). O rejeito arenoso era oriundo da flotação convencional, apresentando alta permeabilidade e, com isso, satisfatória resistência em condições drenadas. Este

rejeito arenoso era destinado para a disposição na Barragem de Germano e Fundão, Dique I e na cava exaurida de Germano e, após a drenagem, era utilizado como material para o alteamento das barragens pelo método de montante e na implantação das demais estruturas. Já o rejeito fino (lama), oriundo da deslamagem e do processo de recuperação do minério de ferro nas colunas 'recloner', era depositado no reservatório da Barragem do Germano (Baia 3) e no Dique 2 da Barragem de Fundão, em função de sua baixa permeabilidade e resistência.

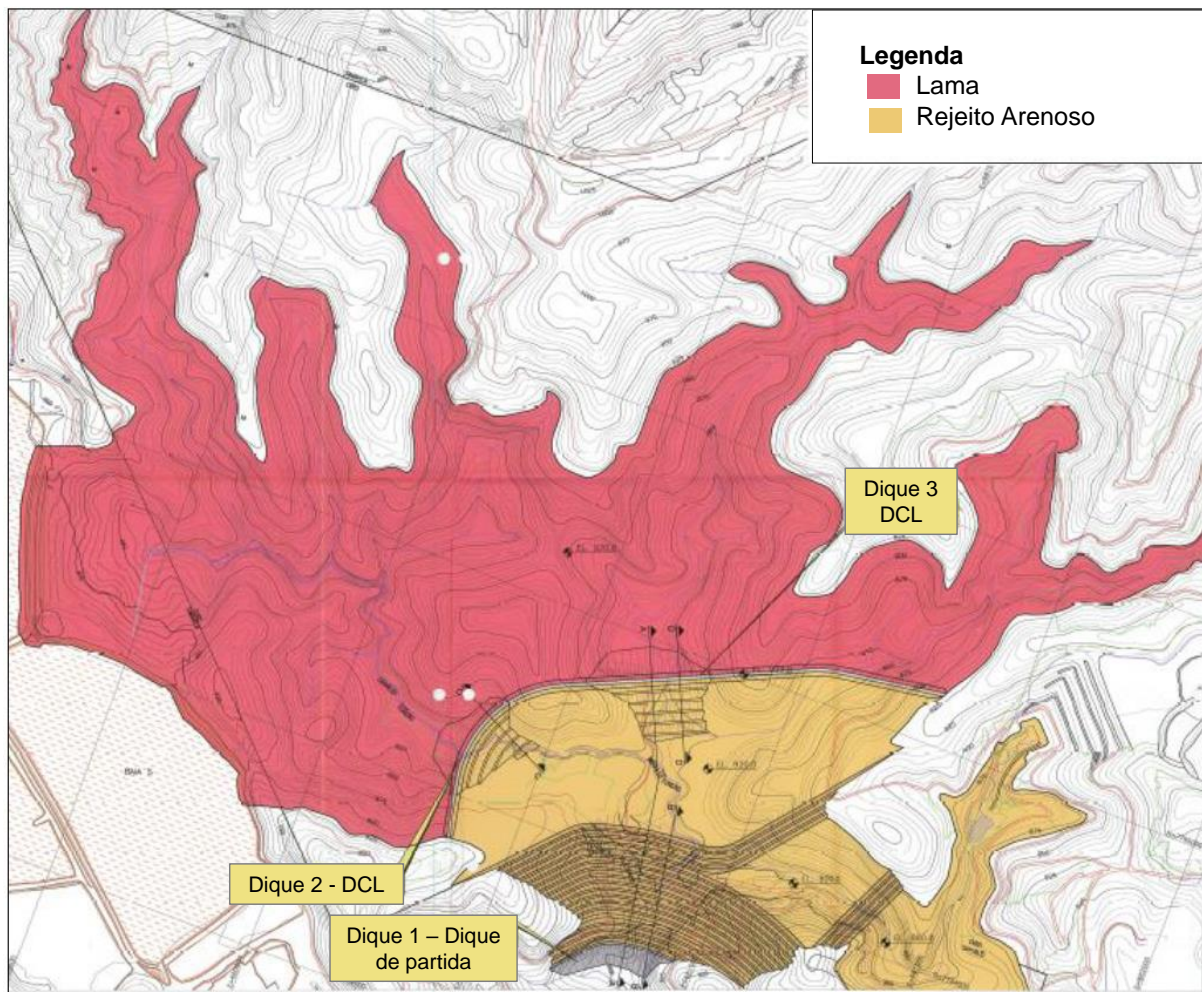
Figura 21 É Croqui esquemático do corte da Barragem do Fundão



Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

A Barragem de Fundão possuía a finalidade de atender à demanda de controle ambiental para a disposição de resíduos sólidos, oriundos do processo de produção e beneficiamento do minério de ferro. Conforme mencionado, a disposição no reservatório de Fundão era realizada de forma separada, em reservatórios específicos para resíduos arenosos e lama (Figura 22). O dique de partida para Empilhamento de Rejeitos Arenoso (ERA) estava localizado na porção mais a jusante do córrego Fundão. Na região mais a montante estavam implantados outros dois Diques de Contenção de Lamas (DCLs). Observa-se que entre o dique de partida do ERA e os dois DCLs existia um reservatório para a disposição do rejeito arenoso, já a montante dos DCLs observa-se um reservatório para a disposição da lama (BRANDT, 2005 *apud* MACHADO, 2017).

Figura 22 É Arranjo Geral da Barragem do Fundão com crista na El. 920,00 m



Fonte: Pimenta de Ávila (2005) *apud* Machado (2017)

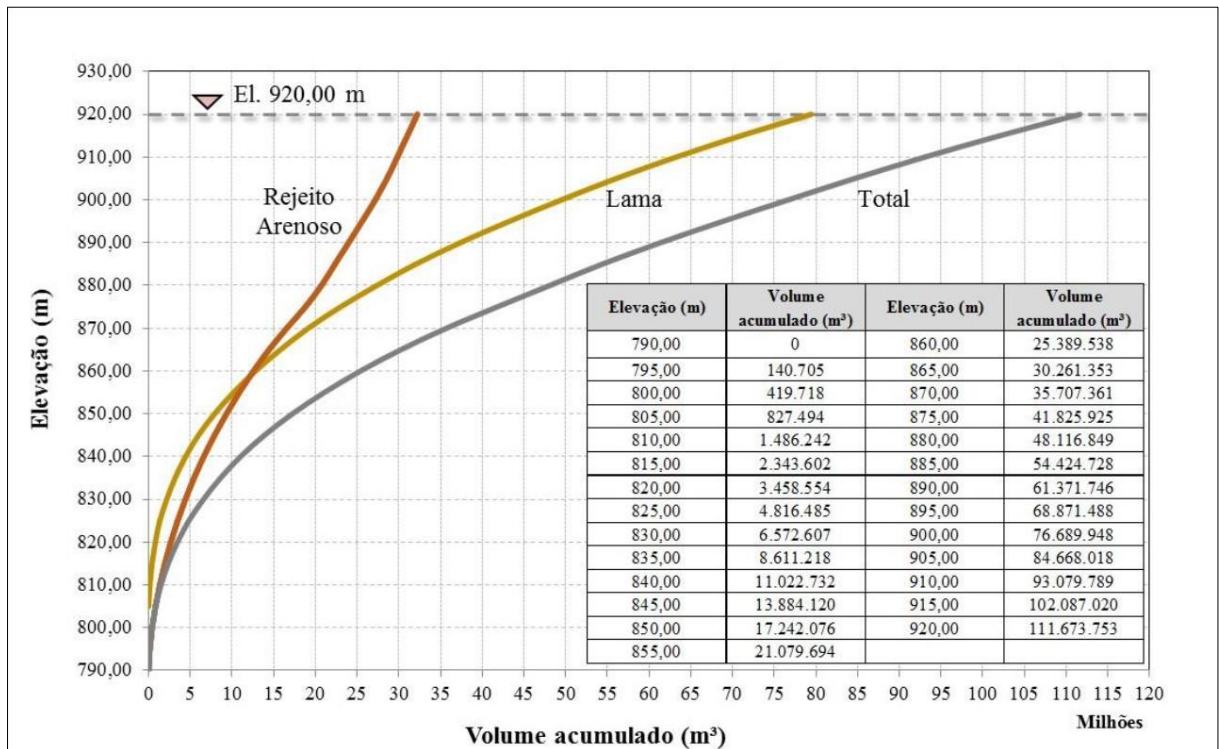
De acordo com Machado (2017), era prevista a realização de alteamentos até a El. 920,00 m. Tais alteamentos eram realizados para montante, utilizando-se o próprio rejeito arenoso como material de construção. A autora destaca ainda que, em sua última etapa de alteamento, na El. 920,00 m, a capacidade final do reservatório de lamas da Barragem de Fundão seria de aproximadamente 79 milhões de m³ (rejeito argiloso) e de 32 milhões de m³ para disposição de rejeitos arenosos, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 É Volume e tempo de enchimento dos reservatórios É Barragem de Fundão

Elevação (m)	Reservatório de Lama (DCLs)		Reservatório de Rejeito Arenoso (ERA)	
	Volume (m ³)	Tempo (anos)	Volume (m ³)	Tempo (anos)
Até 850,00 m	7.885.846	1,58	9.328.512	1,44
Até 920,00 m	79.674.744	15,93	32.208.299	4,96

Fonte: Machado (2017)

Figura 23 É Curva Cota-Volume Fundão (DCLs + ERA)

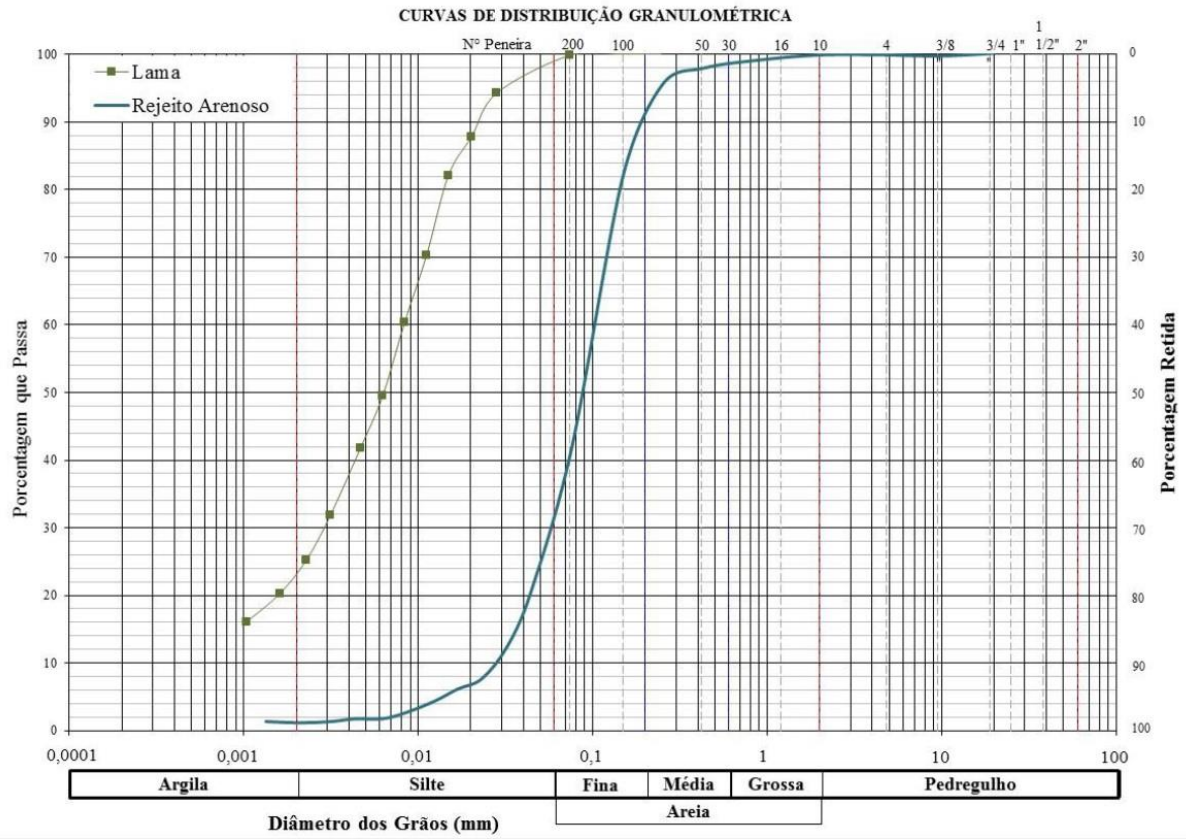


Fonte: Machado (2017)

Conforme destacado por Morgenstern *et al.* (2016), o conhecimento dos materiais depositados na barragem, bem como suas respectivas propriedades, constitui uma etapa fundamental na avaliação de uma ruptura. Os autores destacam que os dois tipos de rejeitos gerados na Barragem de Fundão eram produzidos na forma de lama e transportados em fluxos separados. Os rejeitos arenosos são constituídos de areia e silte, sendo que as areias quando estão soltas e saturadas se tornam mais suscetíveis aos processos de liquefação. Já as lamas, que são materiais de natureza mais fina, são moles e compressíveis com baixa permeabilidade.

A Figura 24 apresenta a curva granulométrica dos materiais depositados na barragem do Fundão. Segundo Morgenstern *et al.* (2016), as areias são compostas por aproximadamente 40% de silte, ao passo que a lama é composta inteiramente de partículas do tamanho de argila.

Figura 24 É Curva granulométrica dos materiais depositados na barragem do Fundão

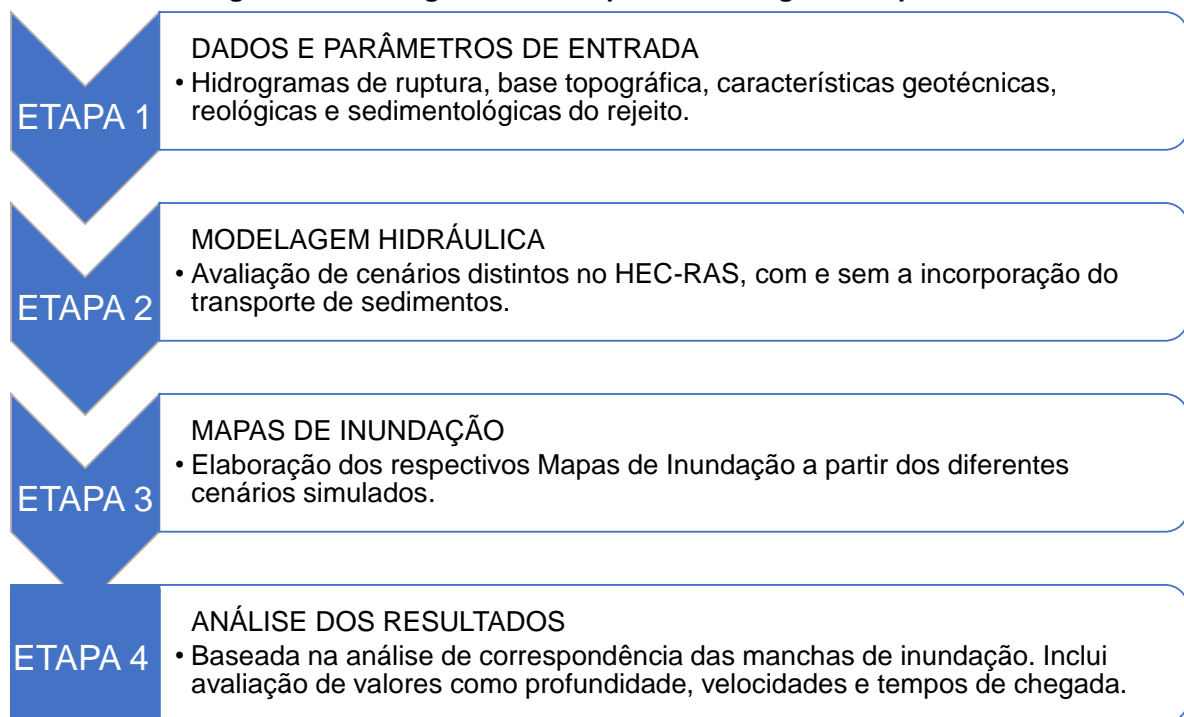


Fonte: Machado (2017) adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

5 METODOLOGIA

O foco do presente trabalho é avaliar o impacto da incorporação do transporte de sedimentos ao longo da onda decorrente da ruptura de uma barragem de rejeitos, utilizando como base de estudo a ruptura da Barragem de Fundão. A seguir estarão apresentadas em maiores detalhes as etapas metodológicas para a construção da avaliação proposta. Em suma, este trabalho será dividido em quatro etapas metodológicas principais, detalhadas nos itens subsequentes (Figura 25).

Figura 25 É Fluxograma das Etapas Metodológicas Propostas



Fonte: Autora (2022)

Salienta-se que, devido à existência de dados observados após o acidente, incluindo a reconstituição da mancha de inundação e o conhecimento dos tempos de chegada da onda no subdistrito de Bento Rodrigues, validados a partir de entrevistas com os moradores e testemunhas por Machado (2017) e por Morgenstern *et al.* (2016), têm-se instrumentos que possibilitam uma verificação da qualidade dos resultados numéricos obtidos.

Metodologicamente, propõe-se a utilização do HEC-RAS por ser um *software* de livre acesso e ser amplamente utilizado por décadas em âmbito mundial. Além disso, o *software* passou por uma grande atualização a partir da sua versão 6.0, na qual

passou a incluir novas funcionalidades, entre as quais destaca-se, principalmente, a possibilidade de cálculos de fluidos não newtonianos e cálculos de transporte de sedimentos bidimensionais (2D). Com isso, a utilização deste *software* no contexto proposto permite confrontar os resultados obtidos numericamente àqueles observados no acidente e, com a utilização de indicadores de desempenho, auxiliar na posterior análise sobre as aplicabilidades de cada modelo.

Os principais parâmetros de entrada no modelo hidráulico são os hidrogramas de ruptura, a caracterização dos rejeitos, incluindo os aspectos geotécnicos, reológicos e sedimentológicos, e a base topográfica a ser utilizada nas simulações. Ressalta-se que, para o presente estudo, foi obtido junto à Samarco Mineração um levantamento topográfico de alta precisão, relativo a área de interesse tanto antes quanto após o acidente. Esse dado, embora apresente uma boa resolução, ainda possui algumas limitações, que serão tratadas em maiores detalhes no Item 5.1.2.

Inicialmente, os cenários a serem avaliados foram construídos com base em informações básicas extensamente compiladas por Machado (2017) e Dias (2017). Os aspectos fundamentais que norteiam a reconstituição de informações básicas como geometria e tempo de formação da brecha de ruptura, determinação do volume propagado e definição do hidrograma de ruptura, estão descritos no Item 5.1.

Foram simulados 5 cenários, cuja construção buscou possibilitar a variação entre modelos constituídos apenas por fluidos newtonianos, modelos com a incorporação dos fluidos não newtonianos e, por fim, modelos que avaliam o impacto da incorporação do transporte de sedimentos. A partir dos resultados das simulações, com auxílio de ferramentas de geoprocessamento, foram construídos os mapas de inundação resultantes, permitindo a avaliação da extensão das manchas de inundação obtidas. Além disso, a partir dos diferentes cenários avaliados, realizou-se a comparação de parâmetros como profundidade, velocidade e tempo de chegada da frente de onda. Por fim, realizou-se uma análise dos índices de desempenho das simulações de forma a quantificar as diferenças observadas.

5.1 Etapa 1 É Dados e Parâmetros de Entrada

5.1.1 Hidrograma de Ruptura

A previsão do hidrograma defluente do reservatório, bem como a propagação deste hidrograma pelo vale a jusante, constituem duas etapas principais na análise de um potencial rompimento de uma barragem (WAHL, 2010). O principal objetivo da propagação hidráulica de um hidrograma de ruptura é a delimitação da área potencialmente alagável a jusante de uma barragem. Para a realização desta análise é fundamental a caracterização do escoamento, com base na definição das velocidades e profundidades máximas e do tempo de propagação do hidrograma pelo vale a jusante. Todas essas informações são fundamentais para a avaliação dos danos relacionados às inundações decorrentes da falha de uma estrutura (SILVA, 2021).

Segundo Wahl (2010), em especial os casos nos quais existem populações em risco localizadas perto de uma barragem, é importante prever com precisão o hidrograma de ruptura e seu tempo em relação aos eventos de falha, de forma a acelerar os esforços de evacuação. Um dos grandes desafios relacionados aos estudos de casos reais reside na qualidade de documentação dos fatos, em especial devido à falta de testemunhas oculares e a variação na forma como tais testemunhas interpretam e relacionam suas observações (WAHL *et al.*, 2008). De forma a buscar maior assertividade na determinação do tempo de ruptura utilizou-se como referência uma análise conjunta dos dados levantados por Machado (2017), a partir de entrevistas com testemunhas, e de relatórios técnicos sobre o evento (*e.g.* Morgenstern *et al.*, 2016).

Machado (2017) realizou no dia 14/11/2015 entrevistas com os antigos moradores de Bento Rodrigues com a finalidade de conhecer os tempos de chegada da onda no subdistrito. A autora indica que, nos relatos concedidos, houve uma convergência entre os entrevistados no que se refere a hora em que a onda de ruptura chegou em Bento Rodrigues, chegando-se a conclusão que o subdistrito foi atingido muito rapidamente, em menos de 30 minutos. Esse tempo de chegada de cerca de 30 minutos em Bento Rodrigues está também de acordo com o indicado por Morgenstern

et al. (2016) e, portanto, foi adotado como referência para a posterior verificação dos resultados obtidos nas simulações hidráulicas realizadas.

O segundo aspecto, relacionado ao volume mobilizado, configura como um parâmetro de difícil definição. Segundo Rocha *et al.* (2017), a estimativa do volume desprendido a ser propagado pelo vale a jusante representa uma das maiores fontes de incertezas associadas ao estudo de ruptura. A Tabela 10 apresenta exemplos de estudos desenvolvidos por alguns autores para estimativa do volume propagado durante a ruptura, sendo possível observar uma grande variação nas faixas de volume, englobando praticamente qualquer valor de referência.

Tabela 10 – Estimativas de Volume Propagado

Fonte	Número de Barragens Analisadas	Altura das Barragens (m)	Volume Liberado na Ruptura	
			Faixa (%)	Média (%)
Lucia (1981)	11	15 a 46	14 a 100	40
USCOLD (1995)	16	20 a 61	1 a 100	29
Garga e Khan (1995)	19	Não informado	3 a 100	28
USCOLD e www.tailings.info	31	12 a 61	1 a 100	26
M. Rico et al (2007)	28	5 a 66	3 a 100	35
Azam e Li (2010)	72	Não informado	Não informado	20

Fonte: Klohn Crippen Berger (2011), Análise de casos históricos

Conforme indicado na Resolução Nº 95, de fevereiro de 2022, os modos de ruptura contemplados nas avaliações realizadas devem considerar o cenário de maior dano potencial associado, sendo para os casos de modo de falha por liquefação, deve-se considerar a totalidade do maciço e volume contido no reservatório no cálculo do volume mobilizável. No presente estudo, a determinação do volume desprendido da Barragem de Fundão foi baseada nos valores compilados por Machado (2017), que considerou, a partir da análise dos valores indicados em relatórios técnicos em consonância com a curva cota x volume do projeto, um total de 32 milhões de m³ desprendidos da Barragem de Fundão, bem como um total de 1,2 milhões de m³ de material que ficou retido na Barragem de Santarém.

O próximo aspecto abordado trata das características da brecha. A formação da brecha depende de vários fatores, entre os quais encontram-se a geometria do aterro, composição do material, métodos de construção, formato da crista, revestimentos dos

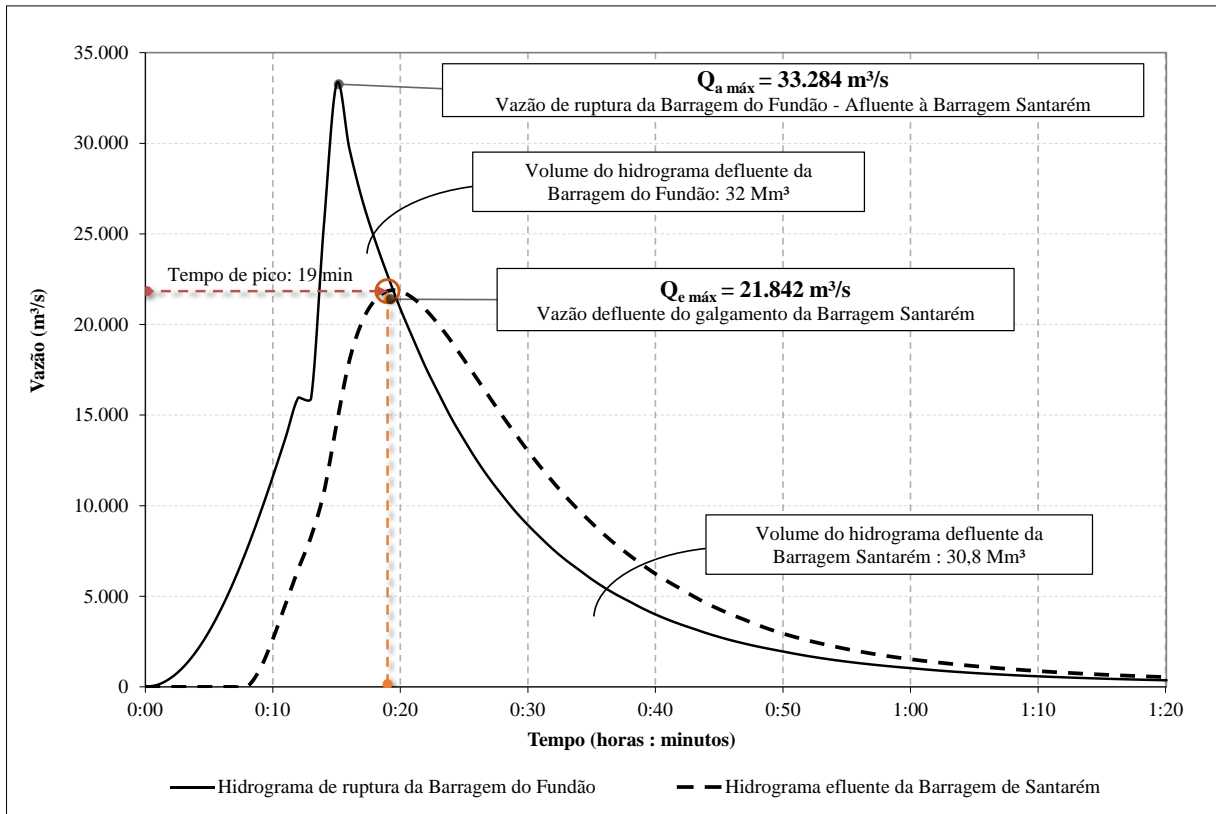
taludes, dimensões do reservatório, fluxo para a barragem durante a falha e o modo de falha (FROEHLICH, 2008). O autor destaca que, em geral, a brecha começa a se formar inicialmente no topo de uma barragem no formato de triângulo e cresce com o tempo se expandindo lateralmente até assumir o formato trapezoidal, ao atingir a base do talude.

Machado (2017) realizou a definição dos parâmetros da brecha a partir de dados de topografia primitiva, utilizando de um MDE SRTM, com resolução de 30 metros, relativo à 11 de fevereiro de 2000, data anterior à construção da Barragem de Fundão (em 2005). A autora utilizou equações de previsão, propostas por Froehlich (2016), Azimi *et al.* (2015), e o modelo hidrológico paramétrico HEC-HMS para a determinação dos hidrogramas de ruptura. A utilização do HEC-HMS permite a representação do evento de ruptura, com o rompimento da Barragem de Fundão e o posterior galgamento da Barragem Santarém.

O modelo HEC-HMS, desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), é um modelo simplificado bastante utilizado e recomendado para a obtenção do hidrograma de ruptura, sendo um modelo baseado na conservação de volume. Nesse modelo encontra-se incluído um algoritmo paramétrico para análise da formação da brecha e cômputo do hidrograma de ruptura através do método de *Puls* (BRANDÃO, 2019). Rocha (2015) indica que o modelo calcula o hidrograma de ruptura através da simulação do crescimento temporal de uma brecha com o formato trapezoidal, no decorrer de um tempo de desenvolvimento pré-estabelecido.

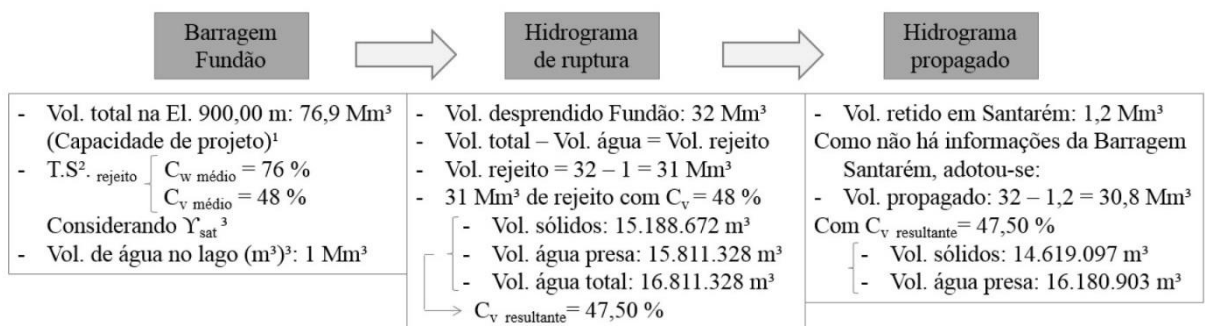
A partir da composição entre dados observados e estimados, englobando parâmetros como o volume desprendido da Barragem de Fundão, o tempo de ruptura, a forma da brecha e a distribuição do volume no tempo, Machado (2017) realizou a determinação do hidrograma de ruptura do evento (Figura 26). A autora, ilustrou conforme apresentado na Figura 27, as referências e premissas que foram utilizadas para a composição dos hidrogramas, nos quais, foram considerados os volumes de água e sólidos decorrentes da ruptura da Barragem de Fundão.

Figura 26 É Hidrograma afluente (referente ao hidrograma de ruptura da Barragem do Fundão) e efluente da Barragem Santarém



Fonte: Machado (2017)

Figura 27 - Composição do hidrograma de ruptura, com especificação dos volumes de água e sólidos



¹ Pimenta de Ávila Consultoria (2008);

² Calculado a partir dos parâmetros de Ferreira (2016);

³ Premissas adotadas.

Fonte: Machado (2017)

Salienta-se que, no presente estudo, considerou-se como hidrograma de entrada nos modelos hidráulicos o hidrograma defluente da Barragem de Fundão, cujo pico foi correspondente à 33.284 m³/s. Conforme destacado por Machado (2017), nos hidrogramas foram incorporados os parâmetros reológicos e geotécnicos dos rejeitos, de forma a possibilitar a simulação hidráulica dos fluidos não newtonianos.

5.1.2 Base Topográfica

A base topográfica é um dado de suma importância na realização da modelagem de uma ruptura de barragem. Conforme destacado por Rocha (2015), existem duas formas principais para a representação topográfica: os modelos digitais de elevação (MDEs) e os modelos digitais de terreno (MDTs). A principal diferença entre eles, segundo o autor, reside no fato de que os modelos digitais de elevação (MDEs) não desconsideram a elevação de objetos posicionados sobre a superfície da terra (como o dossel de árvores em área densamente florestadas), ao passo que os MDTs são referentes a cota altimétrica do nível do solo.

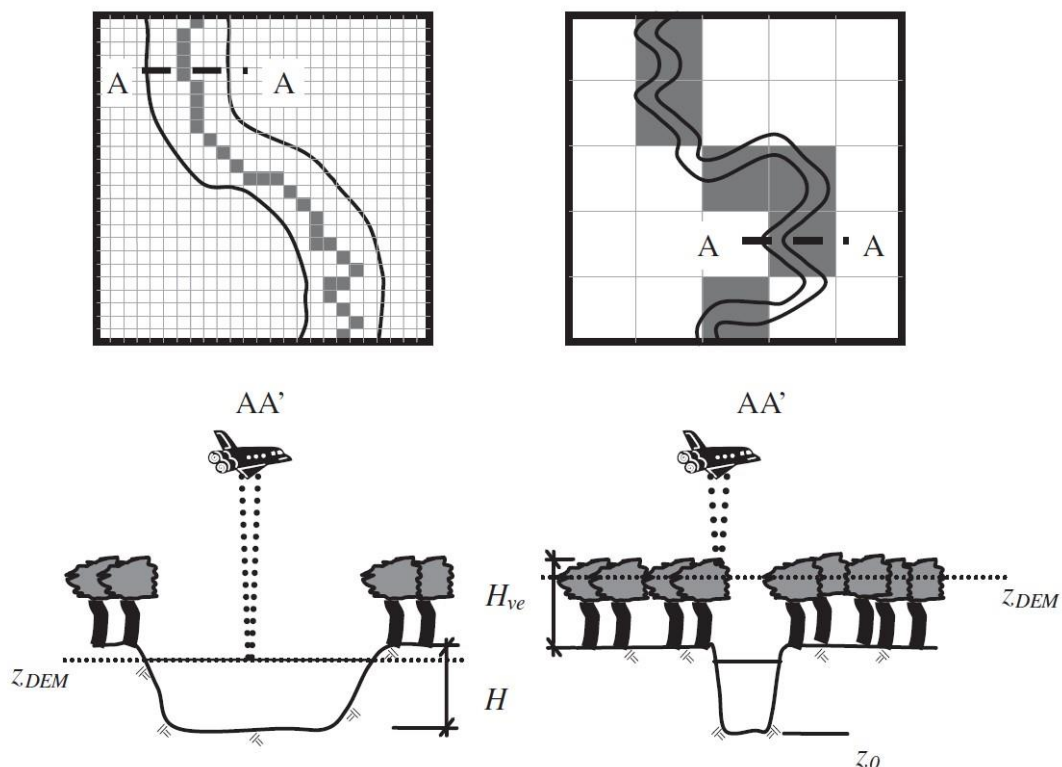
Os MDEs são uma alternativa para geração das bases topográficas uma vez que podem ser obtidos de forma gratuita. Um exemplo são aqueles obtidos através do projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), que utiliza a interferometria por radar, uma técnica na qual, a partir de uma antena central, o imageador emite um sinal e registra as informações de retorno do sinal através de antenas auxiliares posicionadas em uma distância conhecida, enquanto se desloca na sua trajetória (ROCHA, 2015). Os dados InSAR (Interferometria de Radar de Abertura Sintética) foram coletados no modo de passagem única durante a missão do ônibus espacial *Endeavour* realizada no ano 2000, sendo as informações de elevação obtidas pelo processamento das informações coletadas pela banda C do espectro de micro-ondas com o sinal retornando de objetos da superfície terrestre (não atingindo o nível do solo). Os dados podem ser baixados do site *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (LIMA *et al.*, 2021). Este modelo digital de elevação possui, atualmente, 30 m de resolução espacial.

Outra alternativa de MDE é o ALOS ASF, que se refere a um refinamento dos dados coletados pela missão SRTM, processados pelo *Alaska Satellite Facility* (ASF) para uso no projeto de correção de terreno radiométrico (RTC) ALOS PALSAR (*Phase Array L-band Synthetic Aperture Radar*). Estes dados encontram-se disponíveis em um resolução de 12,5 m de pixels, relativos à superfície elipsóide WGS84. Em função de sua derivação da banda C das micro-ondas, a altimetria ALOS_ASF também é referida aos objetos da superfície terrestre, podendo ser obtidos através do site ASF (asf.alaska.edu) (LIMA *et al.*, 2021).

Yan *et al.* (2015), destaca que estudos de modelagem hidráulica baseados em STRM podem atingir níveis razoáveis de precisão na avaliação de parâmetros como nível de água e extensão da mancha de inundação, mas, entretanto, ainda apresentam uma precisão muito menor do que os modelos baseados em MDT de alta resolução. Uma das maiores desvantagens relacionadas ao uso do SRTM para modelagem hidráulica está no fato de que a tecnologia por interferometria por radar não possibilita a obtenção da geometria da calha abaixo do nível de água (VIANINI NETO, 2016).

Yan *et al.* (2015) salienta que deve-se atentar para o erro relacionado à altura vertical no SRTM, em especial quando aplicado em menores escalas, uma vez que os ruídos aleatórios podem induzir a erros da ordem de aproximadamente 2 a 5 metros de magnitude. Além dos aspectos previamente destacados relacionados ao MDE, Brandão (2019) evidencia ainda que, em função do tamanho do pixel, em especial para rios estreitos, as elevações das regiões no entorno do curso de água acabam sendo muitas vezes representadas junto à elevação deste curso de água em um único pixel. Com isso, conforme destaca a autora, observa-se uma superestimativa da elevação do fundo do curso de água, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Exemplo do efeito da vegetação e do nível de água, ao compor rasters de diferentes resoluções



Fonte: Paiva *et al.* (2011)

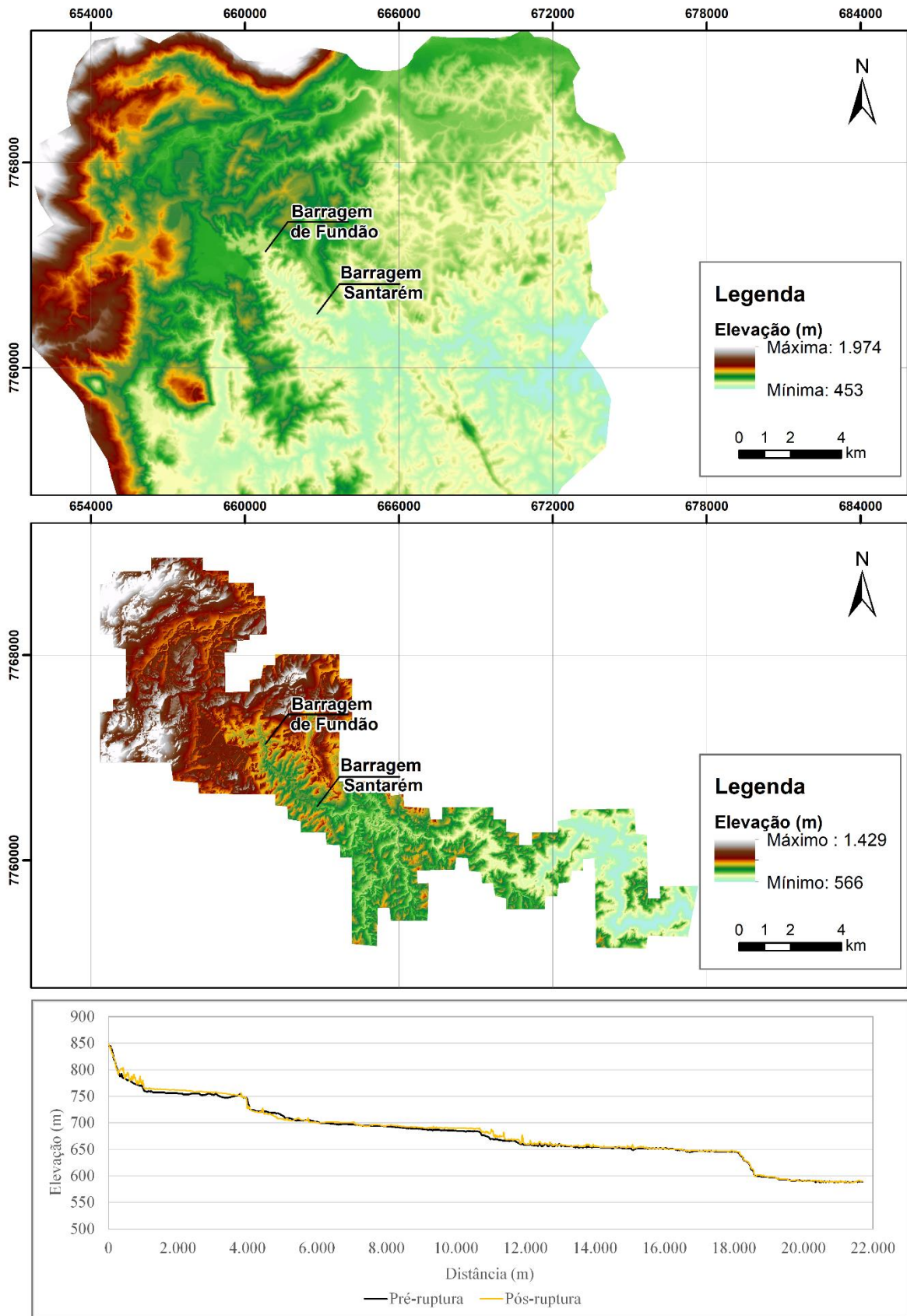
Embora as bases topográficas gratuitas sejam uma possível alternativa diante da falta de dados mais precisos, cabe destacar que os resultados de trabalhos desenvolvidos por Rocha (2015), Vianini Neto (2016) e Lima *et al.* (2021) corroboram para mostrar que é observada uma superestimação na inundação simulada com base em um SRTM. Nas avaliações bidimensionais realizadas por Rocha (2015), o autor concluiu que, de todos os aspectos avaliados em suas análises de sensibilidade (dentre, por exemplo, topografia, hidrograma de ruptura, com variação do volume e vazão de pico e coeficiente de manning), a topografia foi o mais impactante na modelagem hidráulica.

Lima *et al.* (2021) apontam que os custos da aquisição de modelos ALS (*Airborne Laser Scanner*), que trata-se de um MDT, podem ser diluídos no valor total de uma barragem, em especial quando considera-se o possível impacto resultante das imprecisões em modelagens utilizando bases gratuitas. Os autores ressaltam que a utilização destas bases gratuitas podem resultar em inclusão de muitas áreas que não seriam atingidas no caso real de ruptura, levando a um aumento desnecessário dos custos com medidas de prevenção e colocando populações em alerta de forma desnecessária.

No presente estudo, a base topográfica utilizada foi disponibilizada pela Samarco Mineração. Salienta-se que foram disponibilizados dados pré e pós ruptura. A saber:

- ◁ Dados Pré-Ruptura: Topografia englobando o trecho entre a Barragem de Fundão até aproximadamente a intercessão entre o córrego Santarém e o Rio Gualaxo do Norte. Os dados foram enviados em forma de curvas de nível com resolução de 2,50 metros. Com auxílio do ArcGis o dado foi convertido em um MDT com a resolução espacial de 1,50 metros (Figura 29);
- ◁ Dados Pós-Ruptura: Base topográfica disponibilizada compreende trecho desde a Barragem de Fundão até a Usina Hidrelétrica de Baguari (trecho com extensão de aproximadamente 230 km), com uma resolução de 1 em 1 metro. Com auxílio do ArcGis o dado foi convertido em um MDT com a resolução espacial de 1,50 metros.

Figura 29 É Modelo Digital de Terreno (MDT) a ser utilizado na simulação hidráulica É Dado pré e pós ruptura



Fonte: Autora (2022)

Ressalta-se que a simulação foi limitada pela base de referência pré-ruptura disponibilizada. Com isso, os dados pós ruptura foram utilizados apenas no mesmo trecho, uma vez que objetivavam a comparação das zonas de depósitos ao longo da mancha.

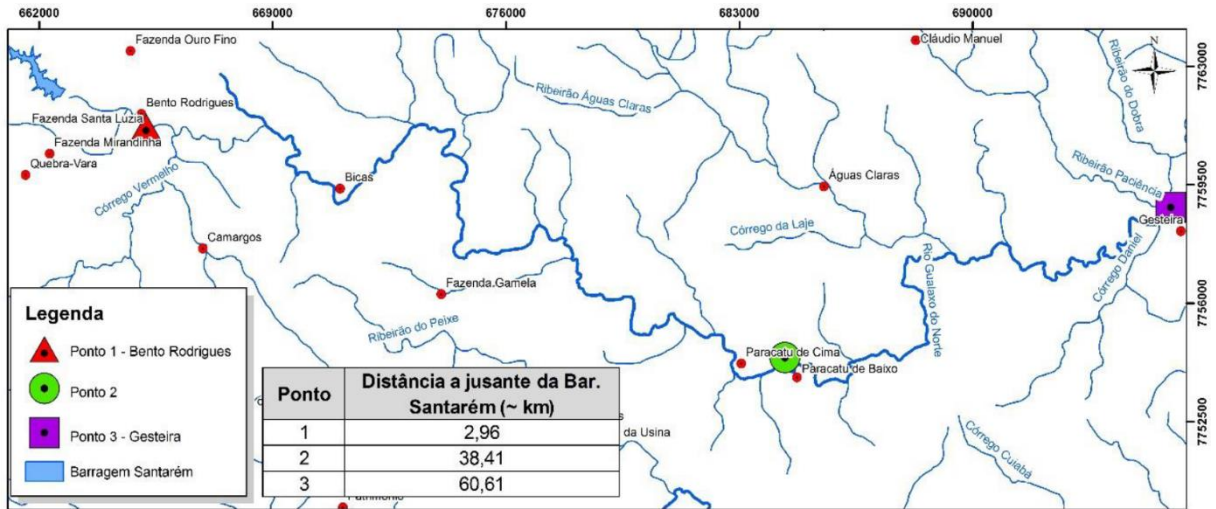
5.1.3 Caracterização Geotécnica, Reológica e Sedimentológica dos Rejeitos

A caracterização dos rejeitos é fundamental para que sejam conhecidas as características do material e para que estas sejam representativas no modelo hidráulico de ruptura. Optou-se, no presente estudo, em função de questões relacionadas a viabilidade de tempo e material disponível, pela utilização dos resultados dos ensaios realizados por Machado (2017) e Dias (2017) como referência para a compilação dos parâmetros de entrada nos modelos.

Machado (2017) indicou que os ensaios foram realizados de forma conjunta com o Laboratório de Mecânica dos Solos (LAMES) da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), sendo executados para a caracterização geotécnica ensaios de granulometria por sedimentação, determinação do peso específico dos grãos, Índice de Plasticidade, Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL). Para os ensaios de reologia, a autora realizou os ensaios com base em 3 metodologias distintas, a saber: reômetro rotacional com palheta coaxial, reômetro rotacional cilindro concêntrico e teste de *slump*. A partir desses ensaios foram determinados os parâmetros de viscosidade e tensão limite de escoamento do material.

As amostras de material utilizadas para a realização dos ensaios de Machado (2017) foram coletadas em 3 pontos distintos a jusante da barragem: um no córrego Santarém (na região próxima a Bento Rodrigues) e outros dois no rio Gualaxo do Norte (Figura 30).

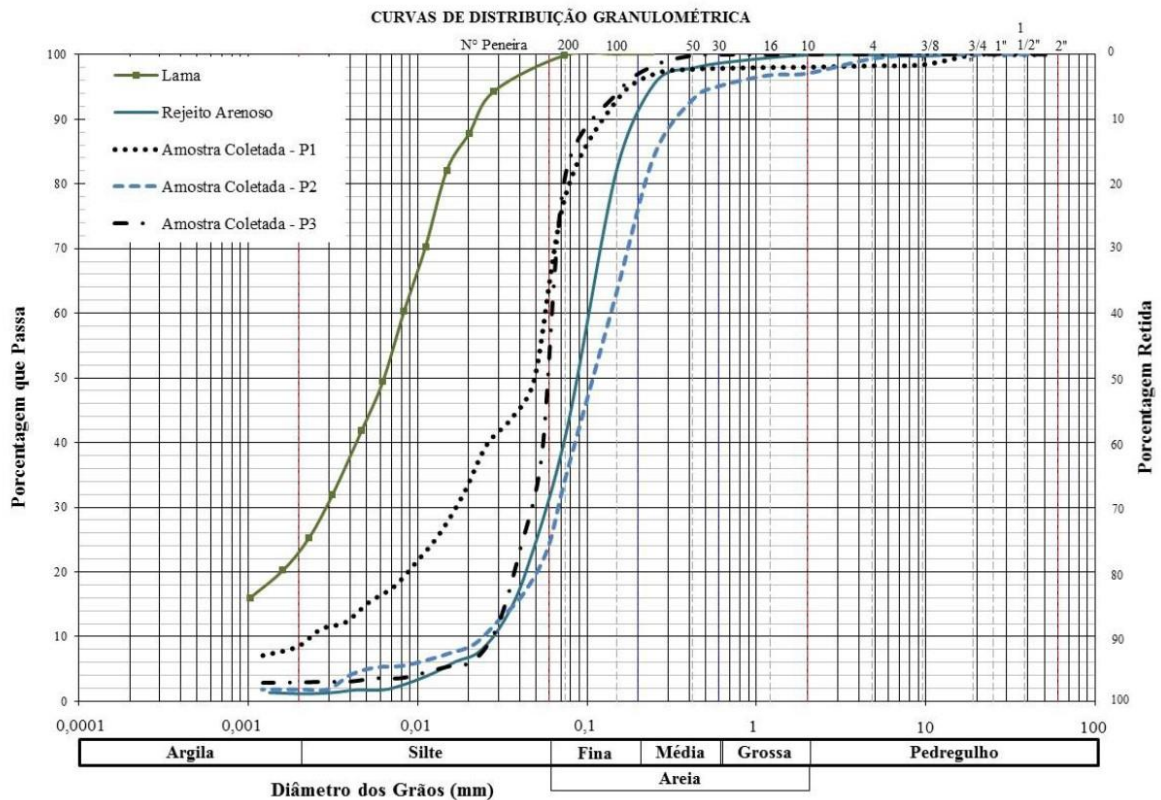
Figura 30 É Pontos de coleta das amostras para realização de ensaios de caracterização do rejeito



Fonte: Machado (2017)

A Figura 31 apresenta a curva granulométrica compilada por Machado (2017) a partir do resultado dos ensaios de peneiramento. A autora destaca que a amostra coletada no ponto P2 se assemelha de forma considerável a um rejeito arenoso, ao passo que a amostra retirada do ponto P1 encontra-se entre a curva do rejeito arenoso e da lama.

Figura 31 É Curva Granulométrica dos Pontos 1, 2 e 3 coletados em comparação com rejeito lançado na Barragem do Fundão

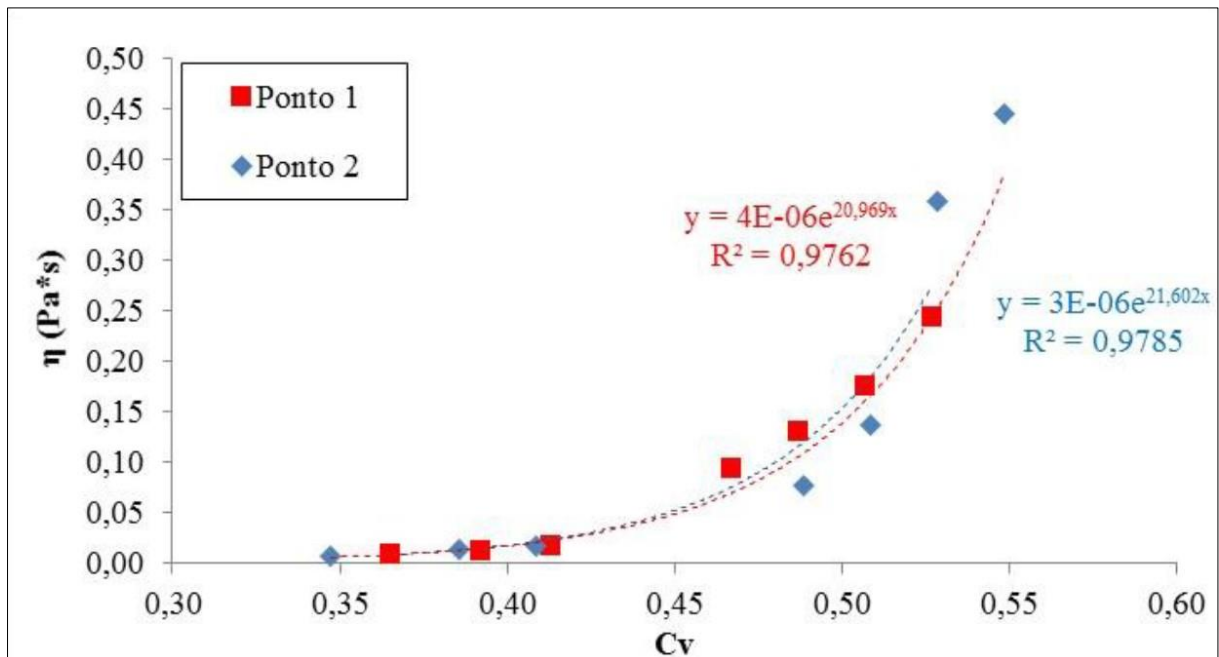


Fonte: Machado (2017)

A Figura 32 apresenta a composição das curvas exponenciais de viscosidade versus concentração volumétrica (Cv). Estas curvas foram obtidas para as amostras dos Pontos 1 e 2, a partir da utilização do reômetro rotacional com cilindro concêntrico e com palheta coaxial (MACHADO, 2017).

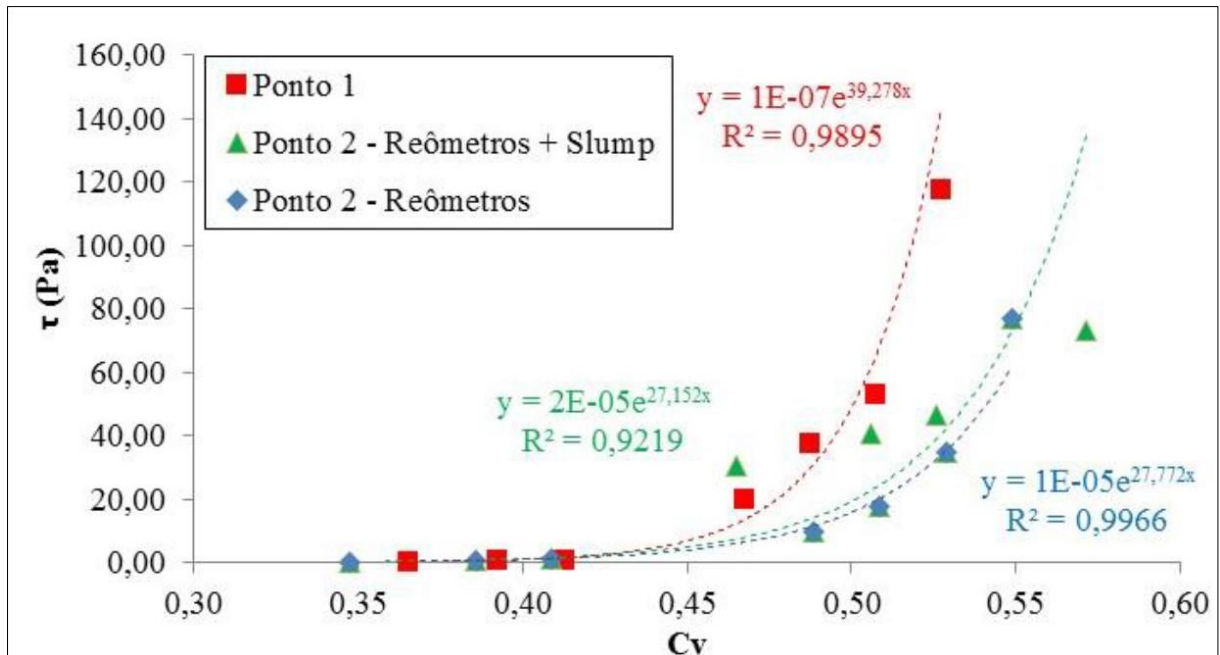
Já a Figura 33 apresenta a composição das curvas exponenciais da tensão limite de escoamento versus concentração volumétrica (Cv). Para as amostras dos Pontos 1 e 2, utilizou-se o reômetro rotacional com cilindro concêntrico e com palheta coaxial. Neste gráfico adicionou-se uma terceira curva, relativa aos valores no teste de slump para a amostra 2 (MACHADO, 2017).

Figura 32 É Composição das curvas exponenciais de viscosidade para as amostras dos Pontos 1 e 2, obtida pelo reômetro rotacional com cilindro concêntrico e com palheta coaxial



Fonte: Machado (2017)

Figura 33 É Composição das curvas exponenciais de tensão de escoamento, para as amostras dos Pontos 1 e 2, obtida pelos reômetros rotacionais (cilindro concêntrico e palheta coaxial) e, para o Ponto 2, adicionando o teste de *slump*



Fonte: Machado (2017)

5.2 Etapa 2 É Modelagem Hidráulica

5.2.1 Cenários Avaliados

De forma a avaliar a influência da incorporação do transporte de sedimentos no estudo de ruptura de uma barragem de rejeitos, serão avaliados 5 cenários, conforme apresentado na Tabela 11. O *software* utilizado é o HEC-RAS.

Tabela 11 É Cenários avaliados

Modelo Hidráulico	Cenário	Fundo	Tipo de Fluido
HEC RAS	1	Leito fixo	Aquoso
	2		Hiperconcentrado
	3		Aquoso com a incorporação dos parâmetros de transporte de sedimentos (Equação Transporte de Soulsby-Van Rijn)
	4		Idem Cenário3 (Eq. Transporte de Van Rijn)
	5		Idem Cenário3 (Eq. Transporte de Wu)

Fonte: Autora (2022)

Salienta-se que a consideração do leito fixo se deve a complexidade de fenômenos envolvidos para que seja incorporada a avaliação em leito móvel. No entanto, conforme destacado por Leal *et al.* (2004), observa-se que em casos de ruptura de

barragens fica mais evidente a capacidade das ondas resultantes pela propagação do fluxo pelo vale a jusante alterarem significativamente a morfologia do fundo.

5.2.2 Propagação da Onda de Cheia pelo Vale a Jusante

Para a realização das modelagens de ruptura é necessária a determinação de condições de contorno da modelagem, que incluem as condições de montante e jusante e a malha computacional, bem como os parâmetros de convergência e estabilidade para o modelo. A saber:

5.2.2.1 Condição de contorno de montante

Como condição de contorno de montante será adotado o hidrograma de ruptura resultante da modelagem paramétrica da formação da brecha realizada com o auxílio do software HEC-HMS por Machado (2017), conforme descrito no Item 5.1.1.

5.2.2.2 Condição de contorno de jusante

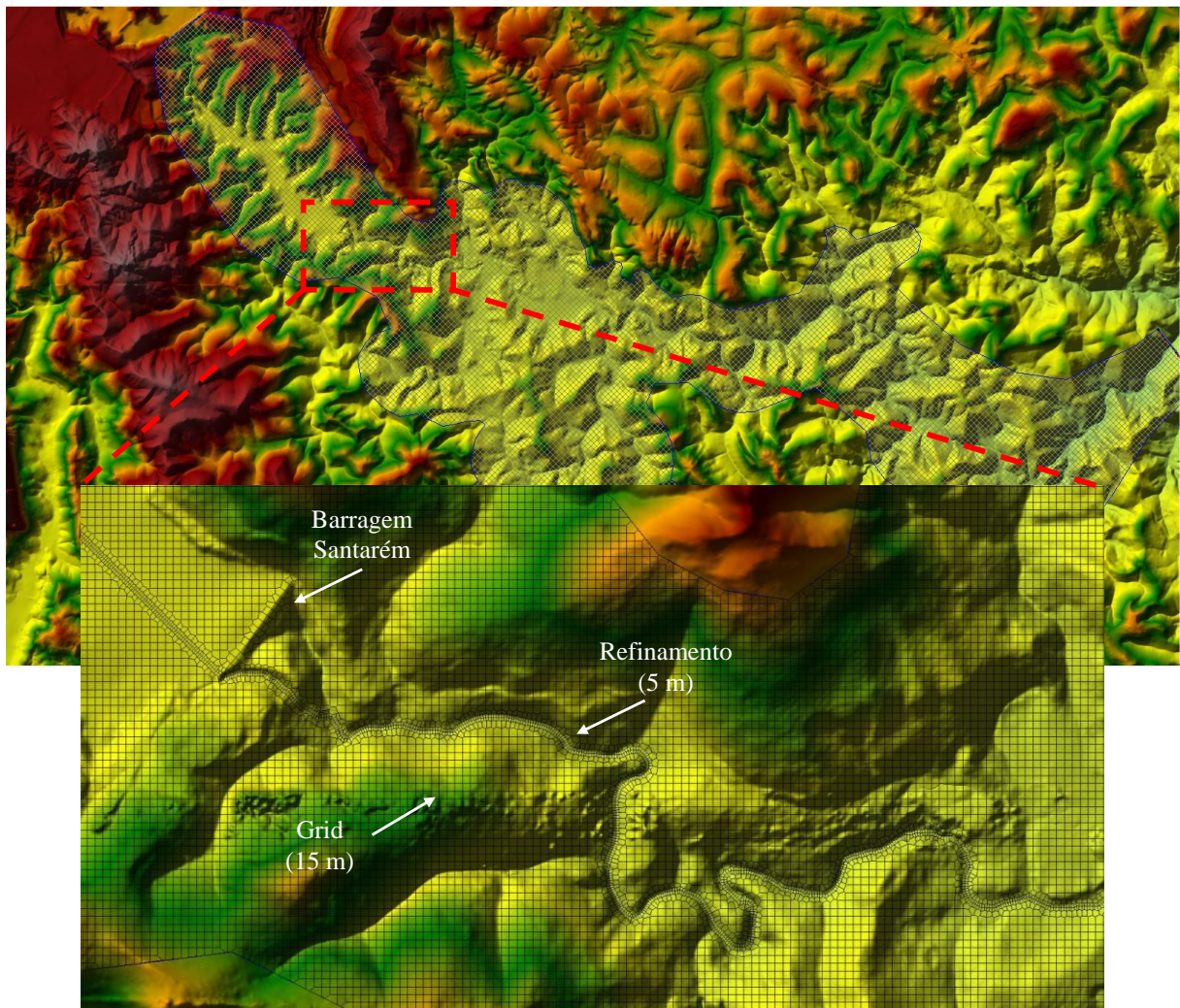
Adotou-se como condição de contorno de jusante a profundidade normal.

5.2.2.3 Malha Computacional

A malha computacional delimita os contornos da modelagem realizada. Ressalta-se que é necessária a determinação do tamanho do *Grid* inicial a ser utilizado, que idealmente deve buscar uma interseção entre a utilização de um *Grid* com menor espaçamento possível e a fluidez da modelagem. A utilização de *Grids* muito pequenos, geram uma demanda computacional muito alta, que por vezes torna impraticável a simulação. Por outro lado, a utilização de *Grids* muito grandes dificulta a convergência dos modelos, além de resultarem em uma perda de informações. Uma alternativa usualmente adotada é a utilização de *Grids* um pouco maiores combinados com um refinamento nas áreas de maior relevância para a avaliação, tais como o eixo de cursos da água ou alguma estrutura existente na área de modelagem.

No presente estudo adotou-se um *Grid* de 15 m e foram realizados os refinamentos nas áreas de interesse das calhas dos rios, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 É Malha Computacional 2D



Fonte: Autora (2022)

5.2.2.4 Intervalo de tempo

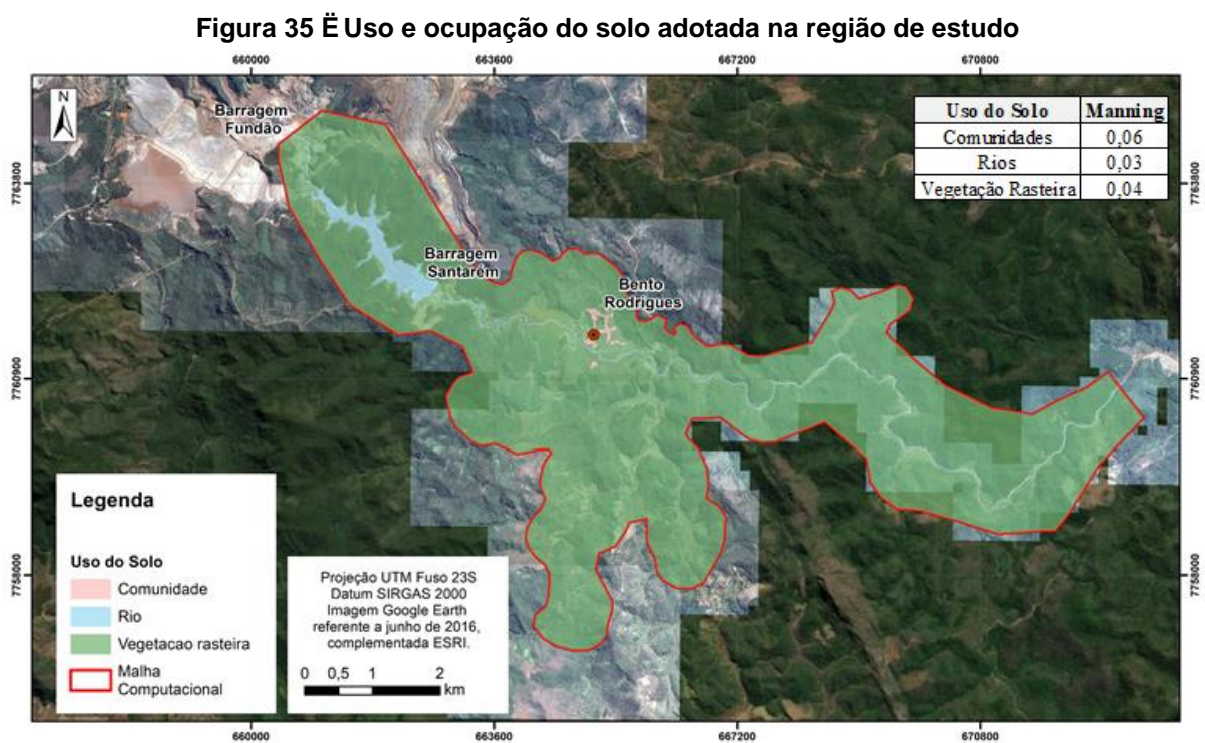
Na modelagem com o HEC-RAS o intervalo de tempo foi calculado de forma variável, buscando o atendimento a condição de *Courant* (conforme apresentado no Item 3.5.1).

5.2.2.5 Coeficiente de rugosidade

Para a caracterização de um escoamento, conforme pontua Silva (2021), são utilizados nos modelos matemáticos coeficientes que representam as forças de atrito que atuam no movimento de um determinado fluido, sendo o mais utilizado o coeficiente de rugosidade de Manning. Este coeficiente é responsável por representar a resistência imposta pelo leito no escoamento do fluido. A determinação deste

parâmetro, entretanto, é muito variável e se relaciona a vários aspectos, como a cobertura da superfície do curso de água, características da vegetação, alinhamento e irregularidade no leito, obstruções, material suspenso e mudanças sazonais (USACE, 2016).

Na presente avaliação realizou-se a determinação do coeficiente de rugosidade de Manning com base na cobertura vegetal apresentada ao longo da malha computacional avaliada. Para cada uso identificado foi atribuído o respectivo valor de Manning para o uso do solo conforme indicado por USACE (2021).



Fonte: Autora (2022)

5.2.2.6 Ponto de parada da modelagem

Segundo a ANA (2016), os critérios mais adequados para a fixação da fronteira de jusante da modelagem de propagação da onda de ruptura de barragens são os que se baseiam nas fronteiras físicas, ou seja, a foz do rio no oceano, a seção de confluência com outro rio de maior porte ou um reservatório a jusante.

No presente estudo este ponto foi determinado em função da topografia disponibilizada. Com isso, o trecho de simulação englobou cerca de 20 km de

extensão a jusante da Barragem de Fundão, sendo próximo a confluência entre o córrego Santarém e o rio Gualaxo do Norte.

5.2.3 Fluido Hiperconcentrado

A partir dos resultados dos ensaios reológicos (Item 5.1.3) são determinados os parâmetros de viscosidade e tensão limite de escoamento do material, para cada uma das diferentes concentrações volumétricas testadas. Conforme destacado por Machado (2017), a compilação destes resultados na forma gráfica permite a determinação da equação exponencial que rege o comportamento daquele determinado material. O formato das equações encontra-se indicado a seguir:

◁ Viscosidade: $\mu = \alpha_1 \exp(\beta_1 C_v)$

◁ Tensão limite de escoamento: $\tau_y = \alpha_2 \exp(\beta_2 C_v)$

Sendo: α_1 e β_1 e α_2 e β_2 os parâmetros a serem determinados, de forma a representar o comportamento reológico do fluido, e C_v a concentração volumétrica.

Conforme adotado por Machado (2017), optou-se pela utilização das curvas reológicas relativas à composição dos resultados do Ponto 1. Dessa forma, para a viscosidade utilizou-se $\alpha_1 = 0,000004$ e $\beta_1 = 20,969$ e para a tensão limite de escoamento $\alpha_2 = 0,0000001$ e $\beta_2 = 39,278$.

5.2.4 Transporte de Sedimentos

A Tabela 12 apresenta uma compilação das equações disponíveis no HEC-RAS para o transporte de sedimentos. Na sequência a Tabela 13 indica as equações disponíveis no HEC-RAS relativas a velocidade de queda das partículas.

Tabela 12 Equações de referência HEC-RAS

Nome e data	Modelo Matemático	Observações
Ackers and White (1973)	$q_{tk}^* = \rho_w g h U X_{tk}^*$	Desenvolvido para estimar a carga total de material uniforme, esta fórmula funciona muito bem para sedimentos uniformes.
<i>Parâmetros</i>	q_{tk}^* = capacidade de transporte de sedimentos [M/L/T]; ρ_w = densidade da água [M/L ³]; g = aceleração da gravidade [L/T ²]; h = profundidade da água [L]; U = velocidade média na profundidade [L/T]; X_{tk}^* = potencial de concentração de sedimento por peso	
England and Hansen (1967)	$q_{tk}^* = \begin{cases} 0,05 n_k \rho_{sk} U^2 \sqrt{\frac{d_k}{g R_k}} \left(\frac{\tau_b}{g(\rho_{sk} - \rho_w) d_w} \right)^{\frac{3}{2}} & \text{para } \tau_b > \tau_{crk} \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases}$	É uma fórmula de potencial de transporte de carga total baseada na potência do fluxo e sua aplicação deve ser restrita a sistemas de areia.
<i>Parâmetros</i>	q_{tk}^* = capacidade de transporte de sedimentos [M/L/T]; τ_b = Tensão de cisalhamento superficial [M/L/T ²]; τ_{crk} = tensão de cisalhamento crítico [M/L/T ²]; U = velocidade atual na magnitude [L/T]; $R_k = \rho_{sk} / \rho_w - 1$ = gravidade de uma partícula submersa [-]; ρ_{sk} = densidade de um sedimento [M/L ³]; ρ_w = densidade da água [M/L ³]; d_k = diâmetro do grão [L]	
Laursen (1968)	$q_{tk}^* = a \rho_w U h \left(\frac{d_k}{h} \right)^{\frac{7}{6}} \left(\frac{\theta'_b}{\theta_{crk}} - 1 \right)^n f_{tk}^{LC} \left(\frac{\mu'_*}{\omega_{sk}} \right)$	Modelo matemático de transporte de sedimentos generalizado para o transporte de cascalho.
<i>Parâmetros</i>	q_{tk}^* = capacidade de transporte de sedimentos [M/L/T]; $a = 0,01$; θ'_b = parâmetro de Shields relacionado a granulação [-]; θ_{crk} = parâmetro crítico de Shields [-]; U = velocidade atual na magnitude [L/T]; h = profundidade da água [L]; n = coeficiente empírico (padrão é 1,0) [-]; ρ_w = densidade da água [M/L ³]; ω_{sk} = velocidade de queda da partícula do sedimento [L/T]; d_k = diâmetro do grão [L]	
Meyer-Peter and Müller (1948)	$\frac{q_{bk}^*}{\sqrt{R_k g d_k^3}} = A_m \rho_{sk} (\theta'_b - \theta_{crk})^{E_M}$	Esta fórmula é mais aplicável ao leito de cascalho uniforme e tende a subestimar o transporte para finos.
<i>Parâmetros</i>	θ'_b = parâmetro de Shields relacionado a granulação [-]; ρ_{sk} = densidade de um sedimento [M/L ³]; ρ_w = densidade da água [M/L ³]; θ_{crk} = parâmetro crítico de Shields [-]; A_M = coeficiente empírico [-];	

Tabela 12 É Equações de referência É HEC-RAS É Continuação

Nome e data	Modelo Matemático	Observações
Yang	$\log_{10}(C_{tk}^*) = \begin{cases} M + N \log_{10} \left[\frac{S_f}{\omega_{sk}} - (U - U_{crk}) \right] & \text{for } U > U_{crk} \\ 0 & \text{for } U \leq U_{crk} \end{cases}$	O autor desenvolveu um método de transporte de sedimentos total baseado na regressão da dissipação de energia potencial por unidade de peso de água e a concentração total de sedimentos.
<i>Parâmetros</i>	<i>C_{tk}[*] = concentração de sedimentos no peso em parte por milhão (ppm) u_* = velocidade da malha [L/T]; ω_{sk} = velocidade de queda do sedimento [L/T]; ν = viscosidade cinemática da água [L²/T]; U = velocidade média na profundidade atual [L/T]; U_{crk} = velocidade média crítica na profundidade atual [L/T]; S_f = coeficiente de atrito [-]</i>	
Wilcock and Crowe (2003)	$q_{bk}^* = \frac{u_*^3 W_k^*}{R_k g}$	A equação foi desenvolvida para aplicação de transporte de cargas de leitos com base em superfícies para leitos graduados com areia e cascalho
<i>Parâmetros</i>	<i>q_{bk}[*] = transporte de sedimentos potencial de carga no solo [L²/T]; u_* = velocidade da malha [L/T]; W_k[*] = função do transporte [L/T]; ρ_{sk} = densidade de um sedimento [M/L³]; ρ_w = densidade da água [M/L³]; g = constante gravitacional</i>	
Soulsby (1997)	$q_{bk}^* = \begin{cases} 0,005Uh \left(\frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{2,4} \left(\frac{d_k}{h} \right)^{1,2} & \text{para } U > U_{crk} \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases}$ $q_{sk}^* = \begin{cases} 0,012Uh \left(\frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{1,5} \left(\frac{d_k}{h} \right) d_{*k}^{-0,6} & \text{para } U > U_{crk} \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases}$	As fórmulas são para a taxa de transporte de sedimentos de cargas total e foram originalmente criadas para sedimentos bem selecionados, porém foram modificadas para aplicações com sedimentos não uniforme.
<i>Parâmetros</i>	<i>q_{bk}[*] = transporte de sedimentos potencial de carga no solo [L²/T]; q_{sk}[*] = transporte de sedimentos potencial de carga suspensa [L²/T]; R_k = ρ_{sk}/ρ_w - 1 = gravidade de uma partícula submersa [-]; ρ_{sk} = densidade de um sedimento [M/L³]; ρ_w = densidade da água [M/L³]; U = velocidade média efetiva na profundidade [m/s]; U_{crk} = velocidade média crítica na profundidade por movimento intermitente [m/s]</i>	

Tabela 12 Equações de referência HEC-RAS Continuação

Nome e data	Modelo Matemático	Observações
Van Rijn (1984; 2007)	$q_{bk}^* = 0,015Uh \left(\frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{1,5} \left(\frac{d_k}{h} \right)^{1,2}$ $q_{sk}^* = 0,012Uh \left(\frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{2,4} \left(\frac{d_k}{h} \right)^{-0,6}$	Equações foram originalmente criadas para sedimentos bem selecionados, porém foram modificadas para aplicações com sedimentos não uniforme.
Parâmetros	q_{bk}^* = transporte de sedimentos potencial de carga no solo $[L^2/T]$; q_{sk}^* = transporte de sedimentos potencial de carga suspensa $[L^2/T]$; $R_k = \rho_{sk}/\rho_w - 1$ = gravidade de uma partícula submersa [-]; ρ_{sk} = densidade de um sedimento $[M/L^3]$; ρ_w = densidade da água $[M/L^3]$; U = velocidade média efetiva na profundidade $[m/s]$; U_{crk} = velocidade média crítica na profundidade por movimento intermitente $[m/s]$	
Wu et al (2000)	$q_{bk}^* = \begin{cases} 0,053 \sqrt{R_k g d_k^3} \left(\frac{\tau'_b}{\tau_{crk}} - 1 \right)^{2,2} & \text{para } \tau'_b > \tau_{crk} \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases}$ $q_{sk}^* = \begin{cases} 2,62 \times 10^{-5} \sqrt{R_k g d_k^3} \left[\left(\frac{\tau'}{\tau_{crk}} - 1 \right) \frac{U}{\omega_{sk}} \right]^{1,74} & \text{para } \tau_b > \tau_{ck} \text{ e } \tau'_b > \tau_{ck} \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases}$	A formulação original pode indicar uma situação irreal de produção de carga suspensa sem carga no leito. Evita-se esta condição aqui, adicionando a condição adicional na equação ao lado.
Parâmetros	q_{bk}^* = transporte de sedimentos potencial de carga no solo $[L^2/T]$; q_{sk}^* = transporte de sedimentos potencial de carga suspensa $[L^2/T]$; $R_k = \rho_{sk}/\rho_w - 1$ = gravidade de uma partícula submersa [-]; ρ_{sk} = densidade de um sedimento $[M/L^3]$; ρ_w = densidade da água $[M/L^3]$; τ_b = stress de cisalhamento da malha $[M/L/T^2]$; τ'_b = Stress de cisalhamento superficial $[M/L/T^2]$; τ_{ck} = stress de cisalhamento crítico $[M/L/T^2]$; d_k = diâmetro do sedimento $[L]$	

Fonte: USACE (2021a)

Tabela 13 Equações de referência Velocidade de queda HEC-RAS

Nome e data	Modelo Matemático	Observações
Rubey (1933)	$\omega_{sd} = F_1 \sqrt{Rgd}$	Fórmula desenvolvida para cálculo da velocidade de queda dos sedimentos que tende a subestimar a velocidade de queda para sedimentos mais rasos que a areia fina.
Parâmetros	$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{Rgd^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{Rgd^3}}$ v = viscosidade cinemática $[L^2/T]$; g = constante gravitacional $(-9,81m/s^2)$ $[L/T^2]$; d = diâmetro do grão $[L]$; $R = \rho_s/\rho_w - 1$ = gravidade submersa [-]; ρ_s = densidade da partícula $[M/L^3]$; ρ_w = densidade da água $[M/L^3]$	

Tabela 13 Equações de referência Velocidade de queda HEC-RAS Continuação

Nome e data	Modelo Matemático	Observações
Van Rijn (1993)	$\omega_{sd} = \begin{cases} \frac{Rgd^2}{18v} & \text{Para } 0,065\text{mm} < d \leq 0,1\text{mm} \\ \frac{10v}{d} \left(\sqrt{1 + 0,01 \frac{Rgd^3}{v^2}} - 1 \right) & \text{Para } 0,1\text{mm} < d \leq 0,1\text{mm} \\ 1,1\sqrt{Rgd} & \text{Para } 0,1\text{mm} \geq d \end{cases}$	A fórmula tem uma descontinuidade para partículas com um tamanho de 1 mm.
<i>Parâmetros</i>	<i>V = viscosidade cinemática [L²/T]; d = tamanho do grão [L]; d* = d(Rg)^{1/3}v^{-2/3} = tamanho não dimensional do grão [-]; R = ρ_s/ρ_w - 1 = gravidade submersa [-]; ρ_s = densidade da partícula [M/L³]; ρ_w = densidade da água [M/L³]; g = constante gravitacional (~9,81m/s²) [L/T²]</i>	
Dietrich (1982)	$\frac{\omega_{sd}^3}{Rgv} = W_* = R_3 10^{R_1 + R_2}$	Dentre as fórmulas, de velocidade de sedimentação, disponíveis para aplicação no HEC-RAS é a única que considera a circularidade das partículas.
<i>Parâmetros</i>	<i>R = ρ_s/ρ_w - 1 = gravidade submersa [-]; ρ_s = densidade da partícula [M/L³]; ρ_w = densidade da água [M/L³]; g = constante gravitacional (~9,81m/s²) [L/T²]; V = viscosidade cinemática [L²/T]; S_f = Corey (1949) fator de forma (geralmente 0,6 – 0,7); P = Powers (1953) índice de arredondamento (geralmente 3,5)</i>	
Soulsby (1997)	$\omega_{sd} = \frac{v}{d} [(10,36^2 + 1,049d_*^3)^{1/2} - 10,36]$	Fórmula de velocidade de sedimentação para sedimentos não coesivos que inclui os efeitos do tamanho e densidade do grão, viscosidade da água e concentração do sedimento.
<i>Parâmetros</i>	<i>R = ρ_s/ρ_w - 1 = gravidade submersa [-]; ρ_s = densidade da partícula [M/L³]; ρ_w = densidade da água [M/L³]; g = constante gravitacional (~9,81m/s²) [L/T²]</i>	
Wu and Wang (2006)	$\omega_{sd} = \frac{Mv}{Nd} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{4N}{3M^2} d_*^3 \right)^{1/n}} - \frac{1}{2} \right]^n$	Fórmula de velocidade de sedimentação que considera a forma das partículas.
<i>Parâmetros</i>	<i>V = viscosidade cinemática [L²/T]; d = tamanho do grão [L]; d* = d $\left(\frac{Rg}{v^2} \right)^{1/3}$; R = ρ_s/ρ_w - 1 = gravidade submersa [-]; ρ_s = densidade da partícula [M/L³]; ρ_w = densidade da água [M/L³]; g = constante gravitacional (~9,81m/s²) [L/T²]; M = 53.5 exp(-0,65S_f); N = 5.65 exp(-0,65S_f); n = 0.7 + 0,9S_f</i>	

Fonte: USACE (2021a)

A partir das equações elencadas na Tabela 12 optou-se pela utilização de 3 equações de referências nas modelagens numéricas: Soulsby-Van Rijn (Soulsby 1997), Van Rijn

(1984; 2007) e Wu et al. (2000). Estas equações constituem as equações disponíveis para a realização da modelagem bidimensional do transporte de sedimentos.

A partir dos resultados das simulações realizadas será avaliado, dentre as equações selecionadas, aquela que apresentou melhor aderência. Salienta-se que um dos objetivos das avaliações, além de verificar a proximidade das áreas inundadas, é buscar verificar a capacidade de previsão das zonas de depósito ao longo do trecho a jusante impactado pela ruptura.

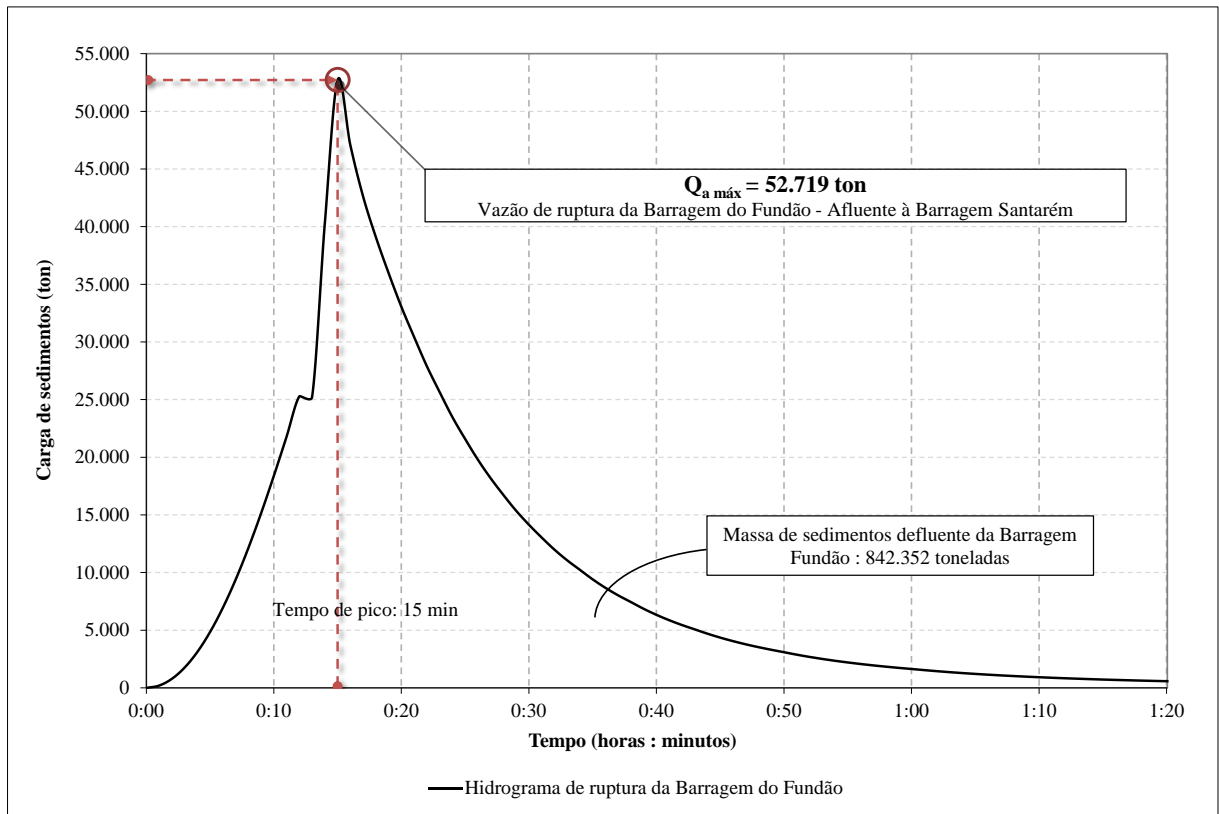
Salienta-se que para a realização das modelagens é necessário a determinação da carga de sedimentos provenientes da ruptura. Para tal, utilizou-se:

$$q = \Delta V \times C_v \times \delta \quad (15)$$

Na qual: ΔV corresponde a vazão no tempo resultante da ruptura da barragem (m^3/s); C_v corresponde a concentração volumétrica e δ corresponde a densidade do grão (g/cm^3).

Os valores da densidade dos grãos das amostras, compilados por Machado (2017), correspondem a 3,37 para o ponto 1, 3,12 para o ponto 2 e 3,22 para o ponto 3. No presente estudo adotou-se o valor de 3,37 como referência por se tratar do ponto localizado mais próximo à barragem. A partir desse dado e considerando-se a adoção de um C_v de 47% e o hidrograma de ruptura relativo à Barragem de Fundão (Figura 26), chegou-se ao hidrograma de propagação dos sedimentos, apresentados na Figura 36.

Figura 36 É Composição da carga de sedimentos resultantes da ruptura da Barragem de Fundão no tempo, em toneladas



Fonte: Autora (2022)

A partir da curva granulométrica (Figura 31) realizou-se a determinação dos volumes de sedimentos de cada faixa de referência, conforme Tabela 14.

Tabela 14 É Classificação granulométrica É Composição da carga de sedimentos resultantes da ruptura da Barragem de Fundão

Material	Faixa	Carga correspondente (ton)
Argila	0,002 - 0,004	101.082
VFM	0,004 - 0,008	151.623
FM	0,008 - 0,016	235.859
MM	0,016 - 0,032	353.788
CM	0,032 - 0,0625	572.799
VFS	0,0625 - 0,125	758.117
FS	0,125 - 0,25	808.658
MS	0,25 - 0,5	825.505
CS	0,5 - 1	826.347
VCS	1 - 2	827.190
VFG	2 - 4	833.929
FG	4 - 8	834.771
MG	8 - 16	842.352

Fonte: Autora (2022)

5.3 Etapa 3 É Mapas de Inundação

Para a elaboração dos Mapas de Inundação e pós processamento dos resultados advindos da modelagem hidráulica foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento que possuem interface com o modelo hidráulico adotado. O ArcGis foi a principal ferramenta de auxílio na elaboração dos mapas.

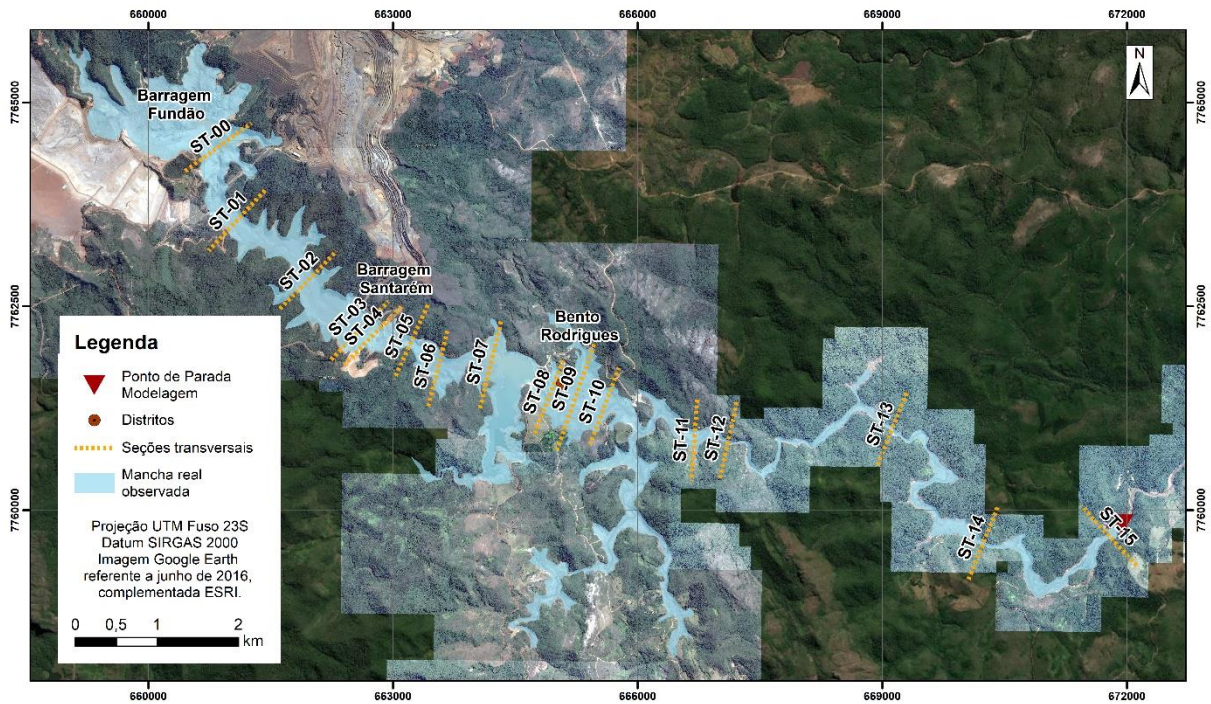
Destaca-se que a mancha resultante tem importância fundamental na determinação dos Planos de Ação de Emergência (PAE). De forma a possibilitar a delimitação da mancha real, foram empreendidas diversas tentativas junto à Fundação Renova visando a disponibilização de uma imagem de qualidade pós acidente. Diante da falta de retorno e da indisponibilidade de imagens públicas de qualidade que retratassem de forma clara a área inundada pós ruptura, utilizou-se o contorno da mancha real compilado por Silva (2020) em seu estudo. Salienta-se que este arquivo *shapefile* foi elaborado com base na imagem disponibilizada pelo *Google Earth* após a ruptura da barragem, não disponível atualmente.

5.4 Etapa 4 É Análise dos Resultados

Para a realização da análise de desempenho dos modelos simulados, bem como para a avaliação de incertezas associadas aos resultados, aplicou-se a abordagem de comparação binária com cálculo dos índices de desempenho F, descrita em maiores detalhes no Item 3.5.2. A partir da utilização da matriz de combinação binária realiza-se a avaliação dos resultados obtidos em cada cenário avaliado. Com base na possibilidade de combinações entre observado/previsto e não observado/não previsto, determina-se os conjuntos A, B, C e D, a partir dos quais é realizado o cálculo dos índices de desempenho F.

A análise dos 5 cenários simulados possui a finalidade de determinar a influência da incorporação do transporte de sedimentos nas avaliações, bem como quantificar o impacto dessa inserção. Para tal, foram determinadas algumas seções transversais ao longo do trecho avaliado, de forma a auxiliar a determinação de parâmetros como vazão máxima, profundidades, tempo de chegada da onda e variação de velocidades. A Figura 37 apresenta uma ilustração da localização das seções a serem avaliadas ao passo que a Tabela 15 indica as respectivas distâncias entre as seções.

Figura 37 Seções transversais de referência para a avaliação e comparação dos resultados das simulações hidráulicas



Fonte: Autora (2022)

Tabela 15 Distância das seções transversais analisadas

Seção	Distância (km)	Seção	Distância (km)
ST-00	0,00	ST-08	7,03
ST-01	1,18	ST-09	7,42
ST-02	2,43	ST-10	7,90
ST-03	3,32	ST-11	9,66
ST-04	3,51	ST-12	10,22
ST-05	4,08	ST-13	13,18
ST-06	4,87	ST-14	16,07
ST-07	5,99	ST-15	18,60

Fonte: Autora (2022)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

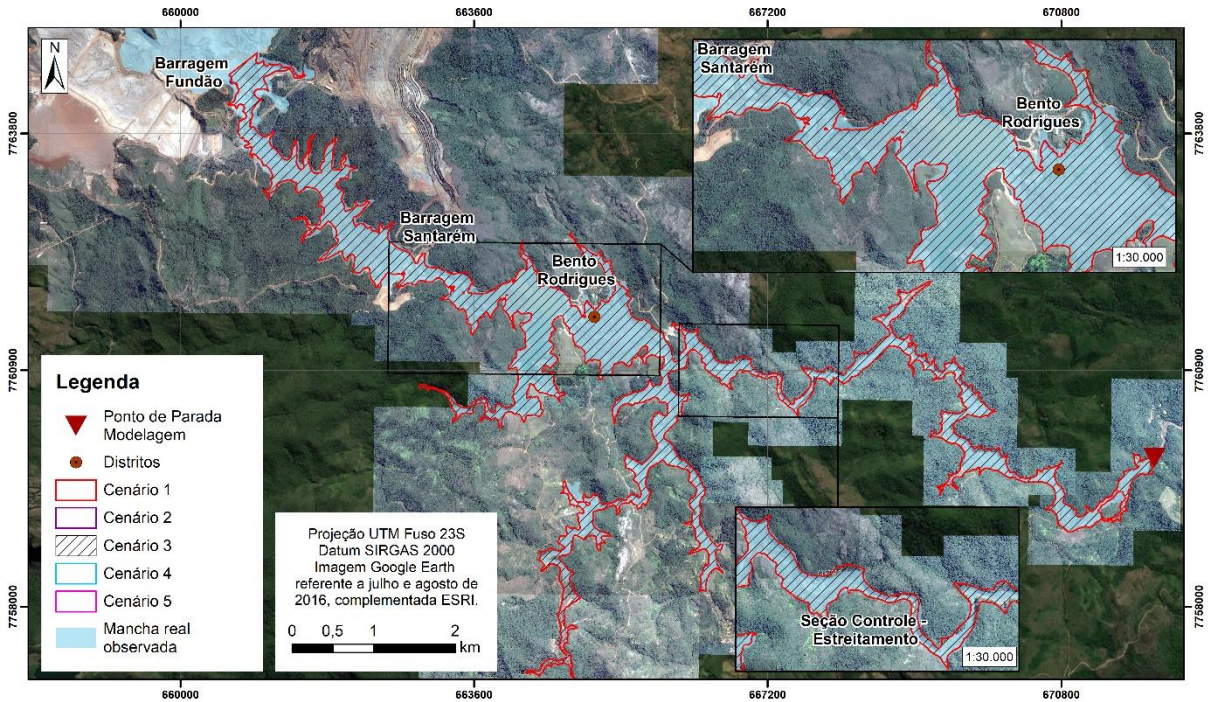
6.1 Resultados da Modelagem Hidráulica

A partir das etapas metodológicas descritas no capítulo de Metodologia (Item 5), foi realizada a propagação hidráulica da onda pelo vale a jusante, com base no modelo bidimensional (2D) do HEC-RAS em sua versão 6.1. Para auxiliar na verificação dos resultados obtidos nos diferentes cenários avaliados (Tabela 11), foram selecionadas 16 seções transversais, previamente apresentadas no Item 5.4. Tais seções buscaram representar pontos de interesse ao longo do vale a jusante, tais como: a Barragem Santarém, o subdistrito de Bento Rodrigues e uma seção de controle hidráulico exercida por um estreitamento localizado no vale logo a jusante de Bento Rodrigues.

Os principais resultados das simulações a serem avaliados são: a mancha de inundação resultante, as profundidades e velocidades máximas ao longo do vale a jusante, os tempos de chegada da frente de onda e as vazões de pico. Todas essas informações constituem subsídios básicos para a elaboração dos Planos de Ação de Emergência de Barragens de Mineração (PAEBM). São, portanto, ferramentas para auxiliar nas análises de risco e são fundamentais para que se promova uma gestão adequada dos riscos envolvidos na operação e manutenção das barragens, conforme destaca Vianini Neto (2016).

Inicialmente, avaliou-se as diferenças nas envoltórias de inundação resultantes dos cenários avaliados. Conforme é possível observar na Figura 38, em termos visuais não é possível a verificação de diferenças significativas nas manchas de inundação entre os cenários considerando-se o fluido aquoso, o fluido hiperconcentrado ou o fluido aquoso com a inserção do transporte de sedimentos. As áreas inundadas corresponderam respectivamente a 5.768.163 m² (Cenário 1), 5.749.152 m² (Cenário 2), 5.759.621 m² (Cenário 3), 5.759.342 m² (Cenário 4) e 5.759.718 m² (Cenário 5). Com isso, observa-se uma diferença de apenas 0,3% entre a maior e a menor área, correspondente aos Cenários 1 e 2, respectivamente.

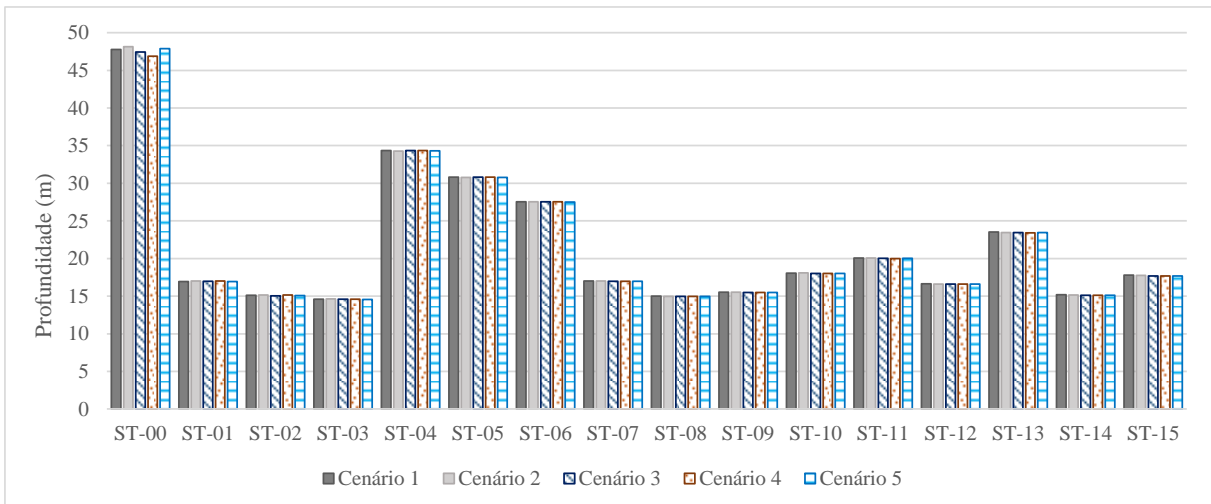
Figura 38 É Mancha de inundação resultante É Avaliação do rompimento da Barragem de Fundão É Comparação entre os cenários avaliados



Fonte: Autora (2022)

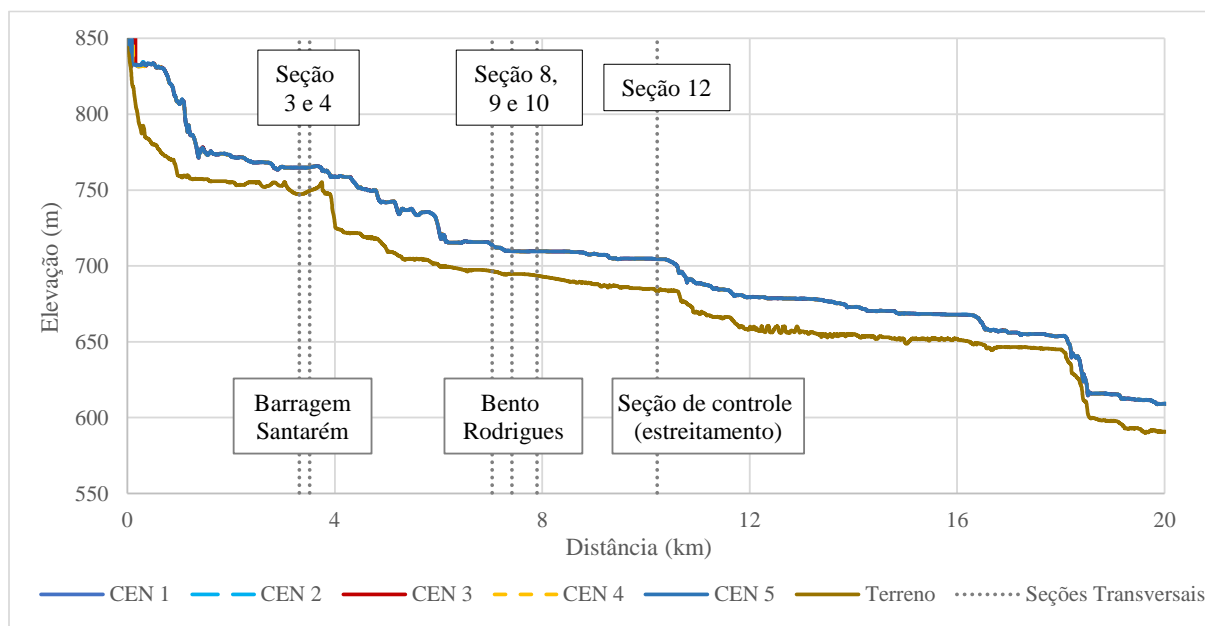
A profundidade máxima do escoamento é de 47,8 metros para o Cenário 1; de 48,1 metros para o Cenário 2; de 47,4 metros para o Cenário 3; de 46,9 metros para o Cenário 4 e de 47,9 metros para o Cenário 5 (Figura 39). Trata-se de uma diferença de 2,6% entre a maior (Cenário 2) e menor (Cenário 4) profundidade máxima. Na sequência, na Figura 40, é apresentado o perfil com a variação das elevações em relação ao eixo do curso da água a jusante da Barragem de Fundão.

Figura 39 É Resultados de profundidades máximas (m) no escoamento ao longo das seções de interesse



Fonte: Autora (2022)

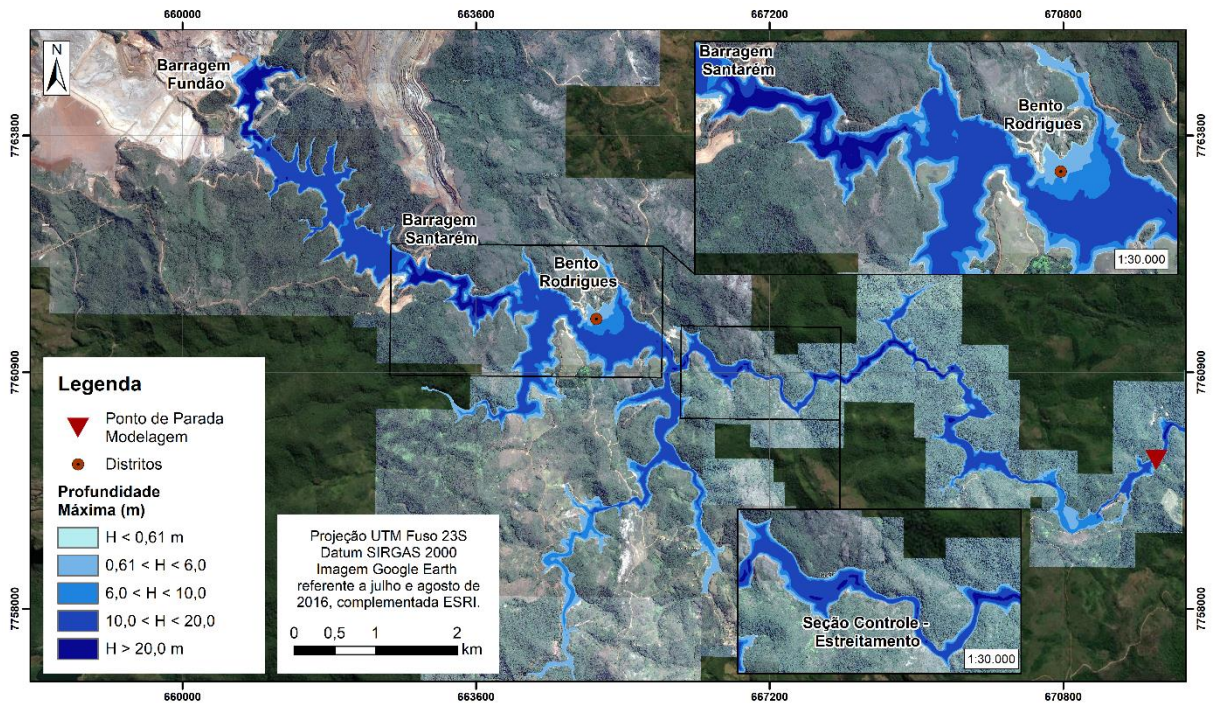
Figura 40 É Resultados de profundidades máximas (m) no escoamento ao longo das seções de interesse



Destaca-se, a partir dos resultados encontrados, que a variação das profundidades nos primeiros quilômetros após a barragem não apresenta diferenças significativas quando considera-se o fluido aquoso, hiperconcentrado ou com a incorporação do parâmetro de transporte de sedimentos. Os resultados encontrados por Brandão (2019) corroboram para essa constatação. Na avaliação realizada por Brandão (2019), que englobou uma extensão de cerca de 100 km a partir da Barragem de Santarém, alcançando a confluência do rio Doce com o rio Piranga, a autora concluiu a partir de suas avaliações que a consideração de um tipo de escoamento newtoniano (aquoso) ou não-newtoniano (hiperconcentrado) não influenciou de forma considerável na profundidade máxima da inundação, não interferindo significativamente, por conseguinte, na abrangência da mancha de inundação.

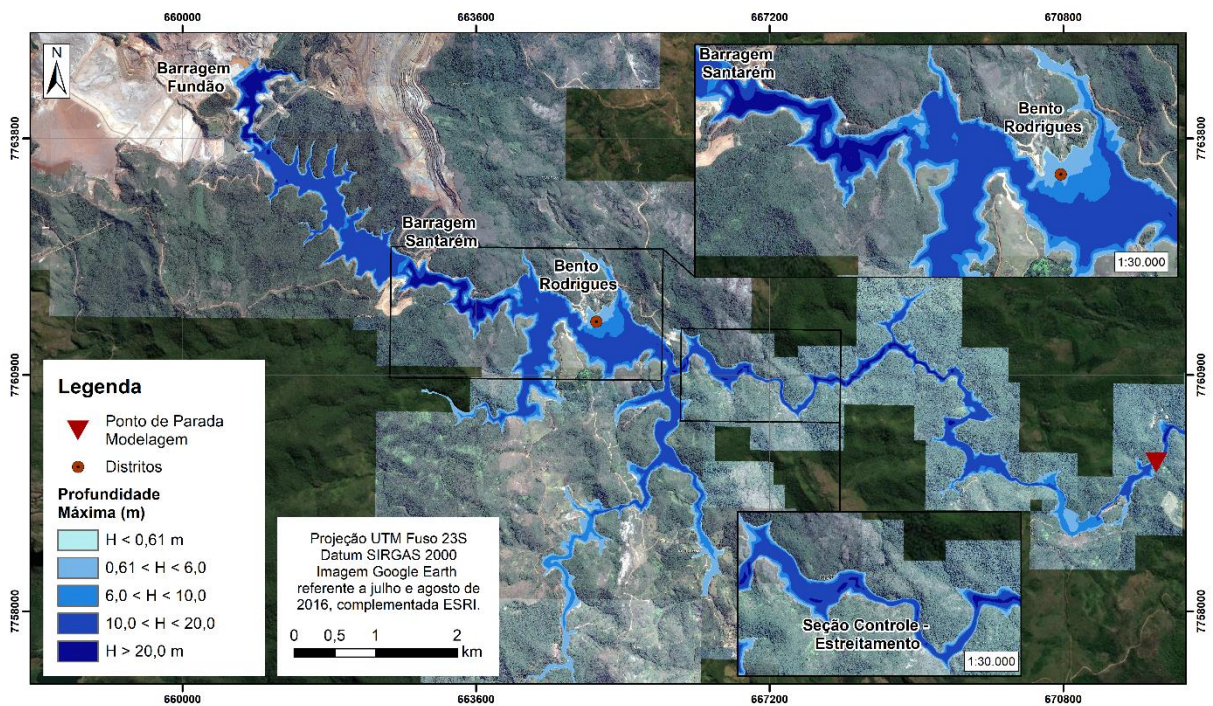
Nas Figura 41 a Figura 43 observa-se que a profundidade máxima oscilou bastante, principalmente em decorrência de trechos encachoeirados, como é nítido, por exemplo, após a Barragem Santarém. Por outro lado, nos trechos mais planos no vale a jusante da barragem, trecho correspondente à região de Bento Rodrigues, por exemplo, e nas regiões dos afluentes, foram observados grandes espriamentos. Salienta-se que, uma vez que não são observadas diferenças significativas nas máximas profundidades entre os cenários avaliados, optou-se por apresentar os respectivos mapas dos Cenários 4 e 5 no Apêndice A.

Figura 41 É Máximas profundidades de escoamento É Cenário 1



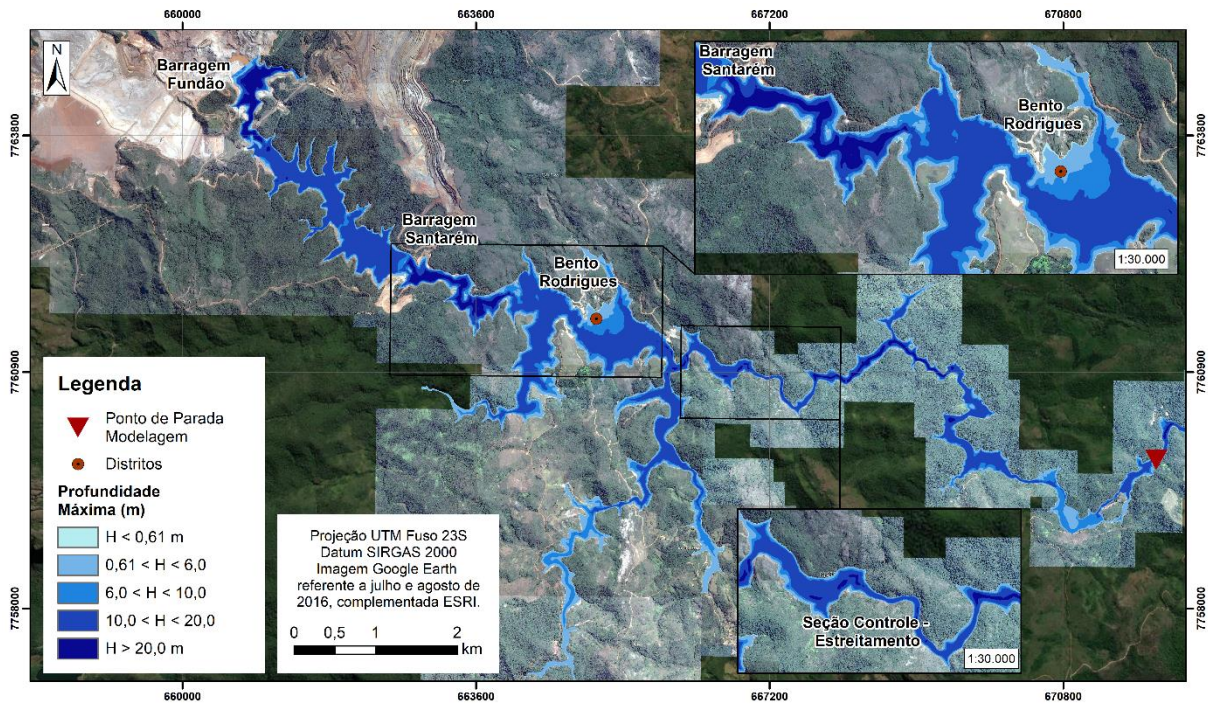
Fonte: Autora (2022)

Figura 42 É Máximas profundidades de escoamento É Cenário 2



Fonte: Autora (2022)

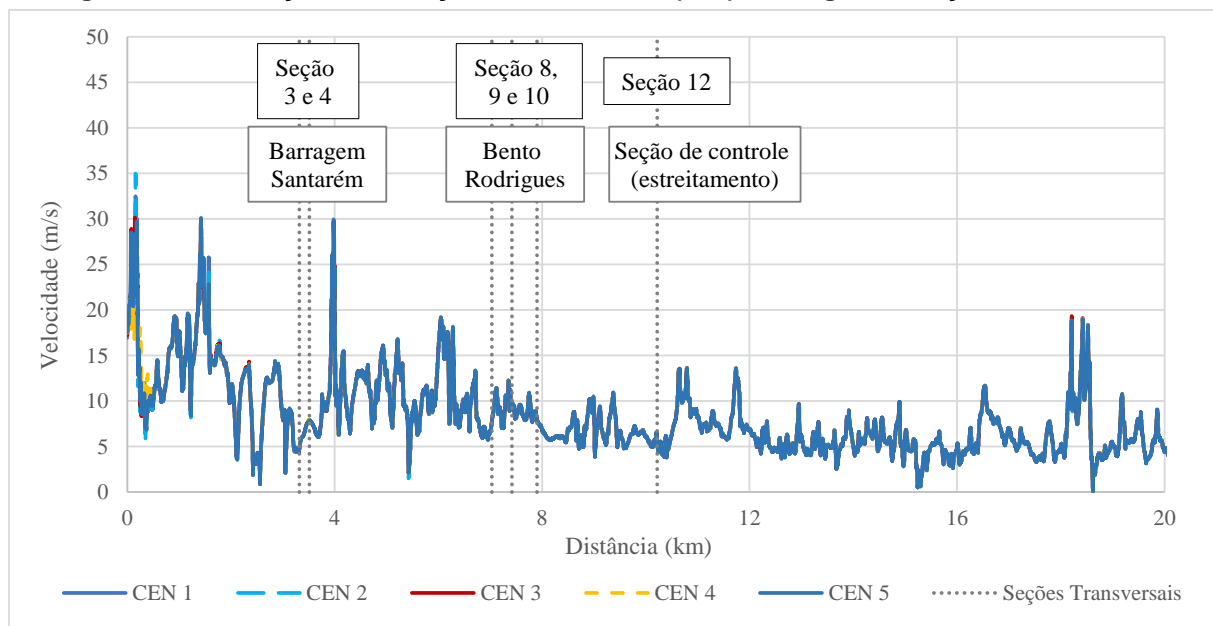
Figura 43 É Máximas profundidades de escoamento É Cenário 3



Fonte: Autora (2022)

Em termos de velocidades máximas (Figura 44), observa-se que as velocidades mais altas coincidem com os trechos mais encachoeirados ao longo do vale a jusante. Salienta-se que, ao avaliarmos as seções de referência, a ST-01 apresentou as velocidades mais altas, sendo 2,1% a variação entre a maior (Cenário 5) e menor (Cenário 1) velocidade máxima, correspondentes a 19,5 e 19,1 m/s, respectivamente.

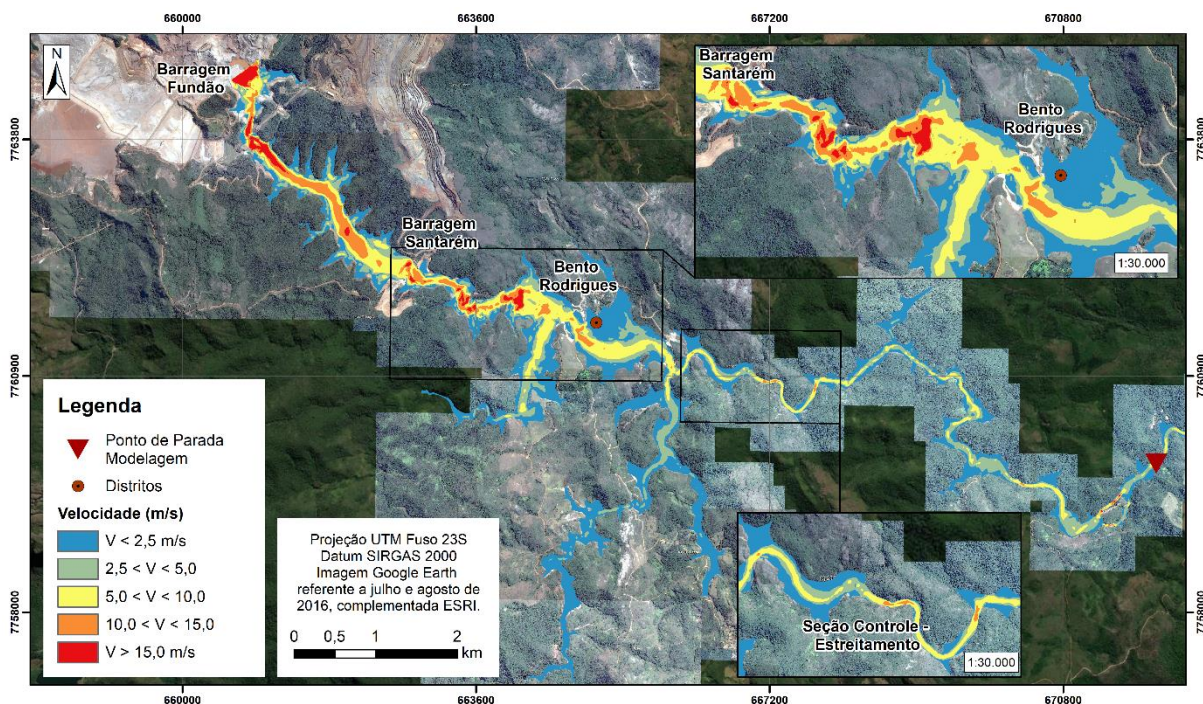
Figura 44 É Avaliação da variação de velocidade (m/s) ao longo das seções de interesse



Fonte: Autora (2022)

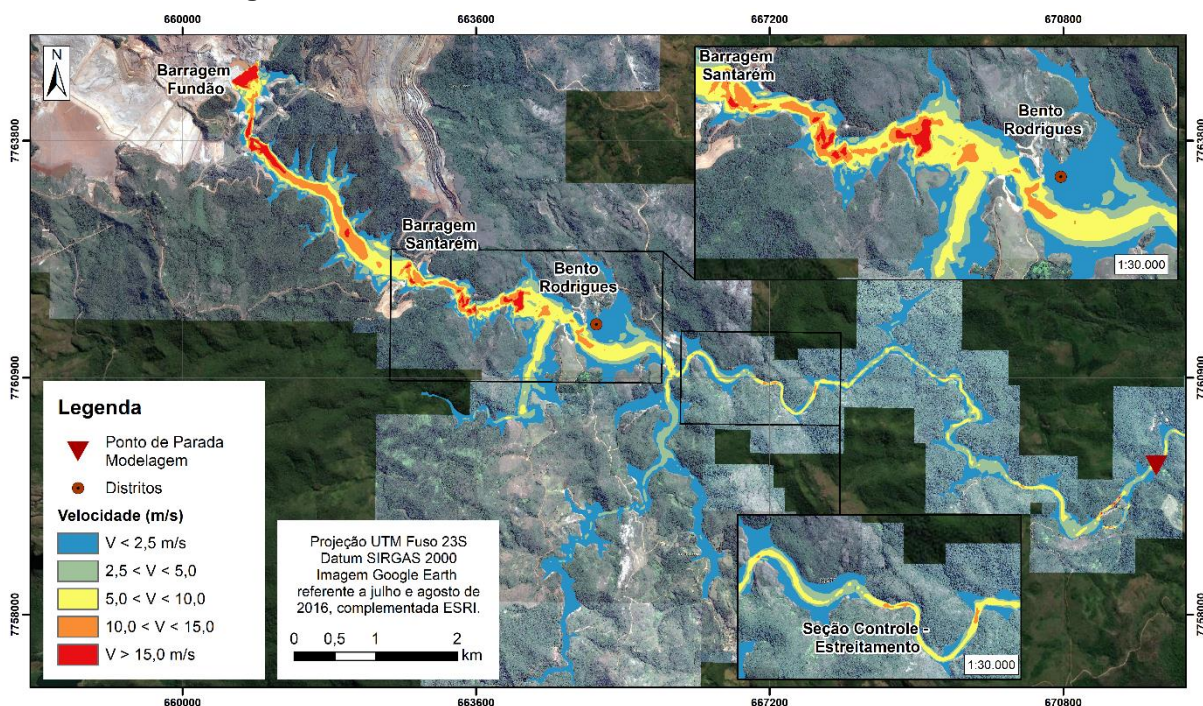
A Figura 45 a Figura 47 apresentam a variação geral das velocidades máximas ao longo das manchas de inundação, sendo os respectivos mapas dos Cenários 4 e 5 apresentados no Apêndice A.

Figura 45 É Máximas velocidades de escoamento É Cenário 1



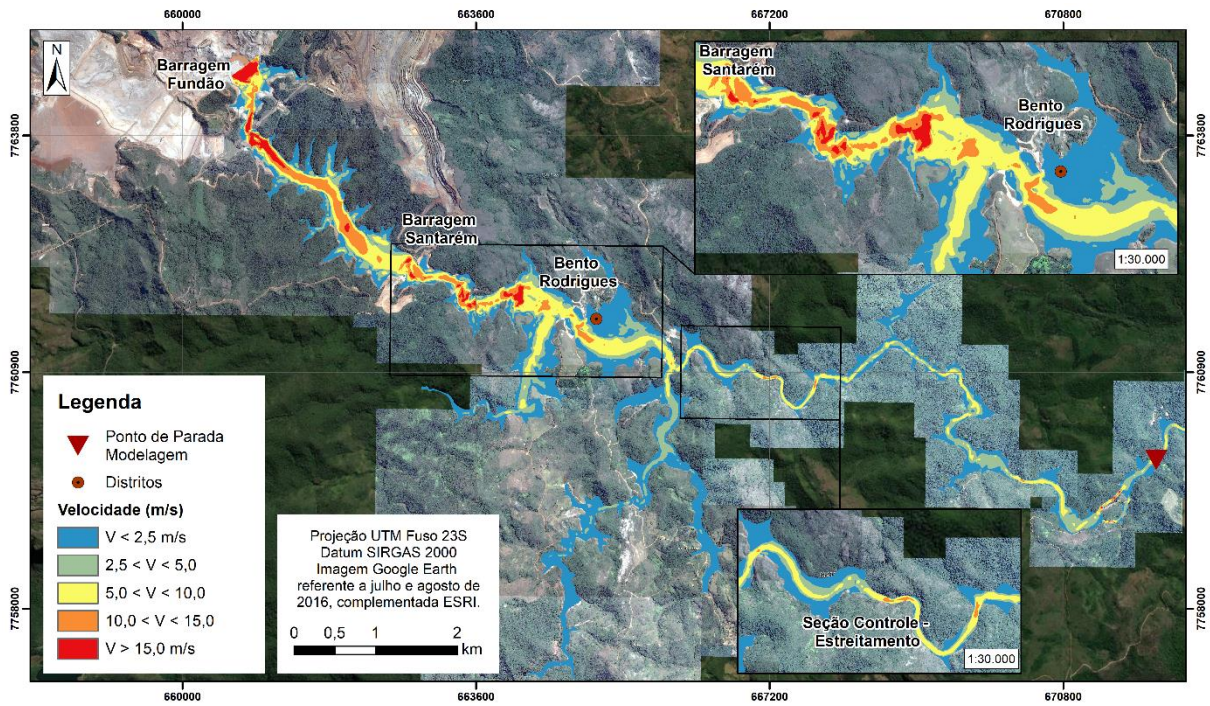
Fonte: Autora (2022)

Figura 46 É Máximas velocidades de escoamento É Cenário 2



Fonte: Autora (2022)

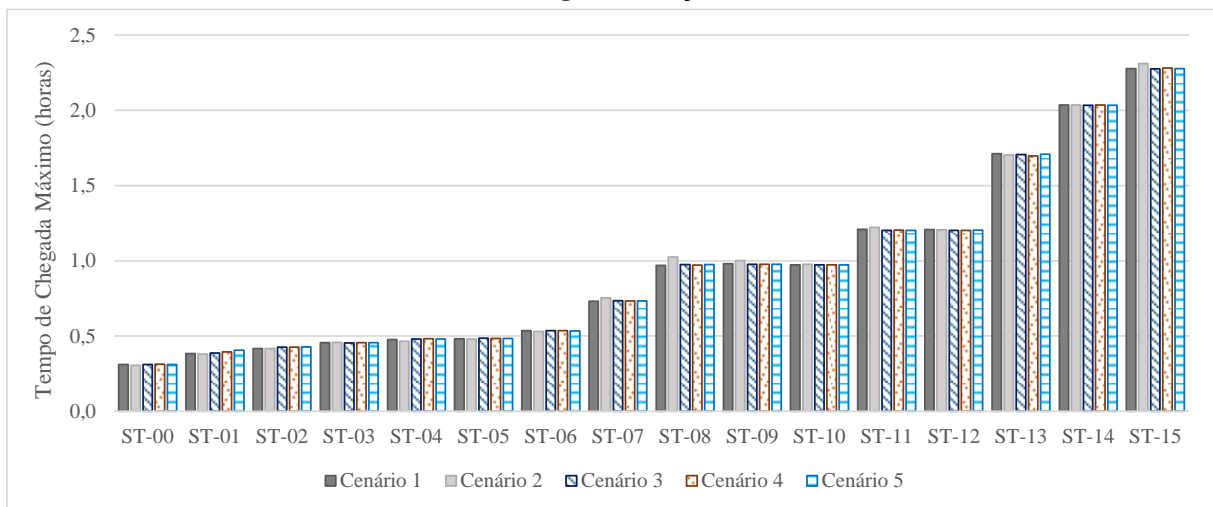
Figura 47 É Máximas velocidades de escoamento É Cenário 3



Fonte: Autora (2022)

O tempo para a máxima profundidade é apresentado na Figura 48. Embora tenha sido observada uma pequena variação do tempo entre os cenários avaliados, destaca-se estes são muito próximos, sendo que na última seção avaliada (ST-15), o tempo do Cenário 1, relativo ao fluido aquoso, e dos Cenários 3 a 5, com a incorporação do transporte de sedimentos, foi de 2,28 horas. Já o tempo para o Cenário 2, com o fluido hiperconcentrado, foi de 2,31 horas. Trata-se de uma variação de 1,3%.

Figura 48 É Resultados de tempo de chegada (horas) para as profundidades máximas no escoamento ao longo das seções de interesse



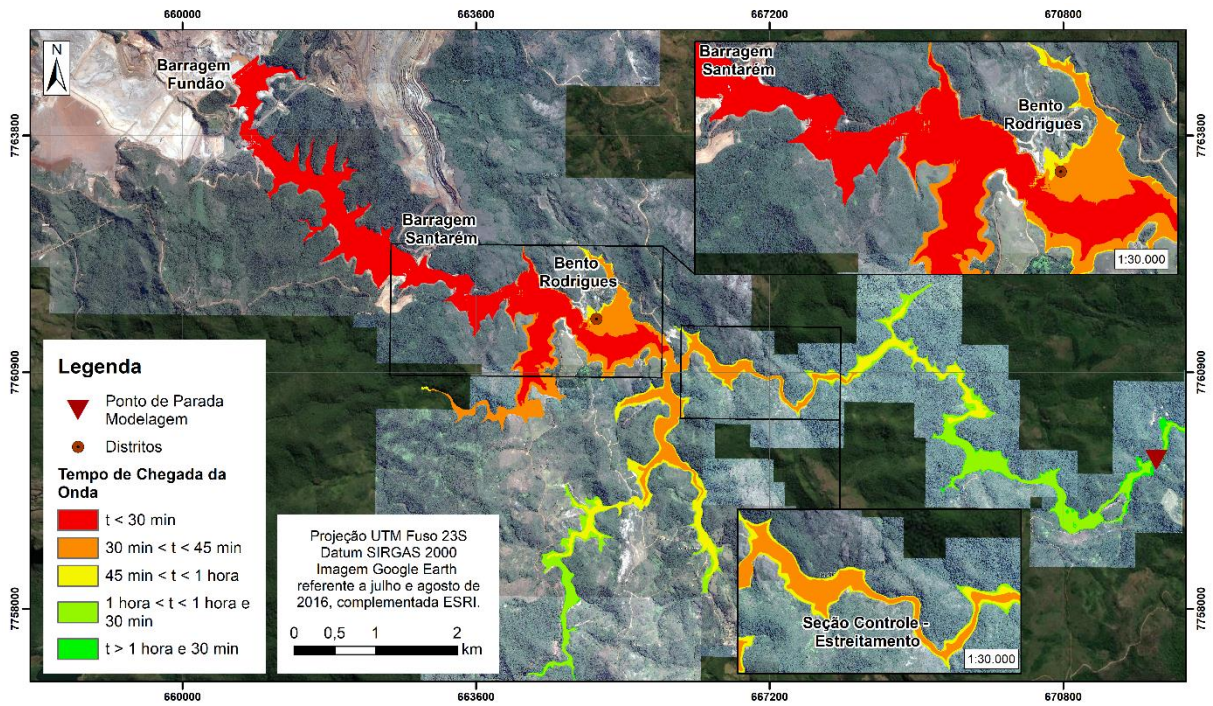
Fonte: Autora (2022)

Em relação do tempo de chegada, um outro parâmetro importante avaliado corresponde ao tempo de chegada da onda de ruptura associada ao tempo necessário para que se observe um nível de água equivalente a 0,61 metros (2 pés). Esta elevação é relativa ao nível considerado no instante imediato da ruptura ou ao tempo relativo à ocorrência da máxima profundidade, como destaca Vianini Neto (2016). O autor salienta que a obtenção desse parâmetro é de grande importância, uma vez que está diretamente relacionada à segurança da população potencialmente atingida em caso de ruptura.

Essa recomendação é apresentada no FEMA (2013), que indica que é aceitável o risco aproximadamente de até 0,61 metros (2 pés) ou abaixo, mas ressalta que existem outras fontes que consideram que o valor aceitável é da ordem de 0,31 metros (1 pé) ou abaixo.

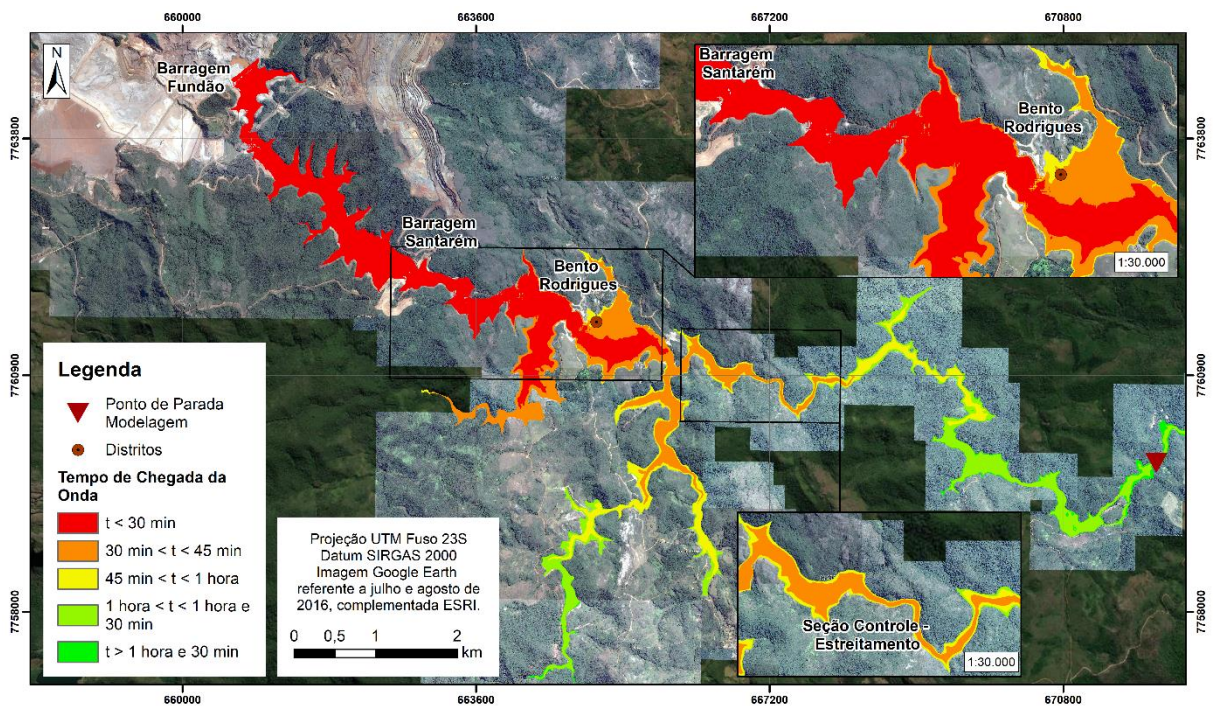
A partir da análise dos resultados observa-se que a onda atinge Bento Rodrigues em cerca de 30 minutos. Os resultados encontrados corroboram com as entrevistas realizadas por Machado (2017), bem como com os resultados da autora, que conclui que a onda de ruptura proveniente da Barragem de Fundão, com posterior galgamento da Barragem Santarém, deixaria o subdistrito de Bento Rodrigues soterrado entre 30 e 60 minutos.

Figura 49 É Tempo de chegada da onda É Cenário 1



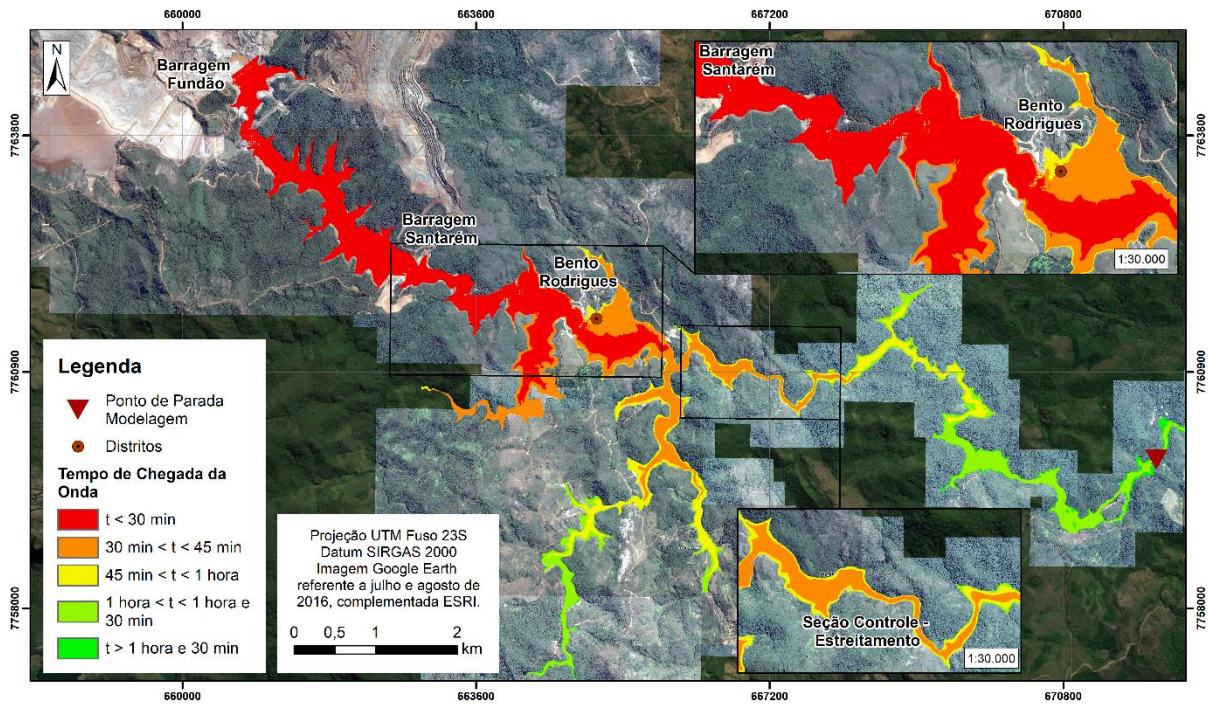
Fonte: Autora (2022)

Figura 50 É Tempo de chegada da onda É Cenário 2



Fonte: Autora (2022)

Figura 51 É Tempo de chegada da onda É Cenário 3



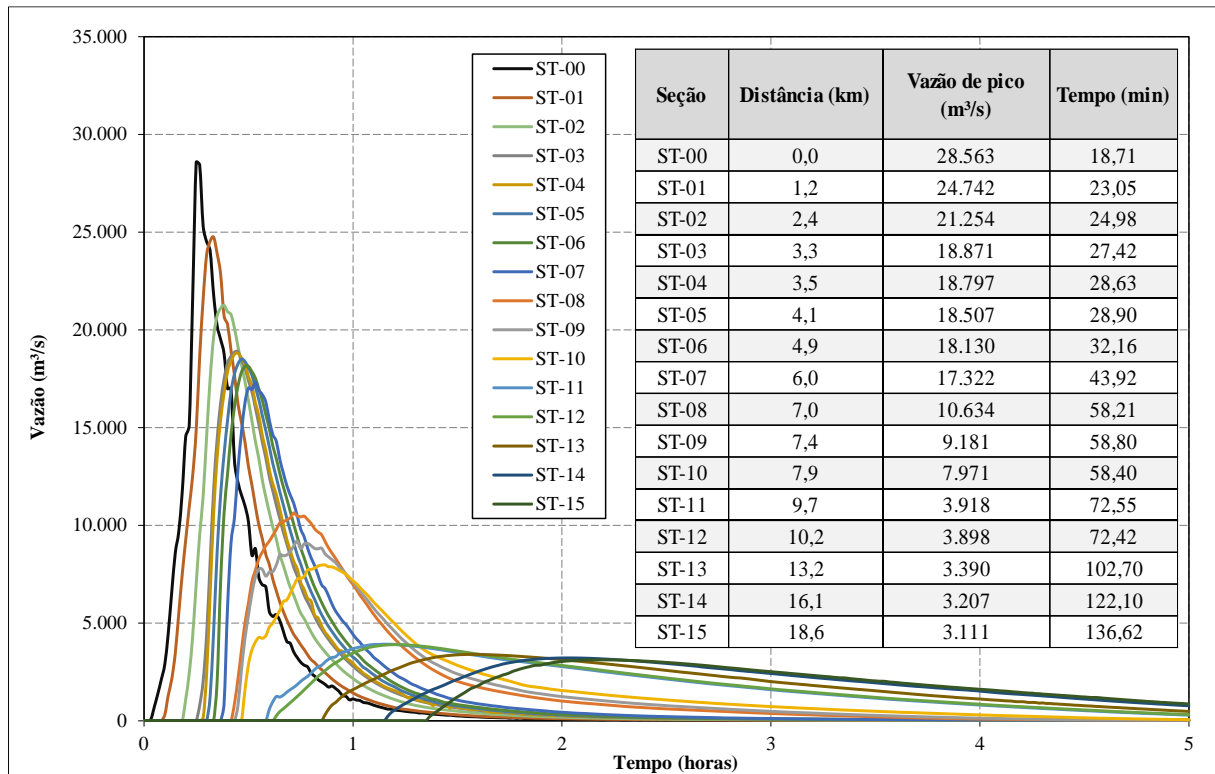
Fonte: Autora (2022)

Salienta-se que, conforme apontado por Brandão (2019), foram apenas observadas diferenças mais significativas nos tempos de chegada da onda com a consideração de um tipo de escoamento newtoniano (aquoso) ou não-newtoniano (hiperconcentrado) a partir de 25 km de distância da Barragem de Santarém. Nos primeiros 25 quilômetros do trecho simulado, a autora obteve praticamente o mesmo tempo de chegada da onda, concluindo que a concentração volumétrica dos sólidos (C_v) calculada para todo o trecho, embora represente um escoamento hiperconcentrado, encontra-se em uma fronteira limiar com o escoamento aquoso. Com isso, ainda que tenha-se adotado um único valor de C_v para todo o trecho simulado, os resultados obtidos indicaram que à medida que se distancia do reservatório, este C_v tende a diminuir em função da diluição do escoamento. Por fim, a autora ressalta que a velocidade de propagação de um fluido viscoso tende a ser menor que a de um fluido não viscoso, já que existem maiores forças resistivas ao movimento.

A atenuação das vazões ao longo das seções de referência pode ser observada a partir dos hidrogramas obtidos em cada uma das seções a uma distância D a jusante da barragem. Os resultados apresentados mostram que os valores máximos dos hidrogramas (Q) em cada uma das 16 seções avaliadas é muito próximo, em especial

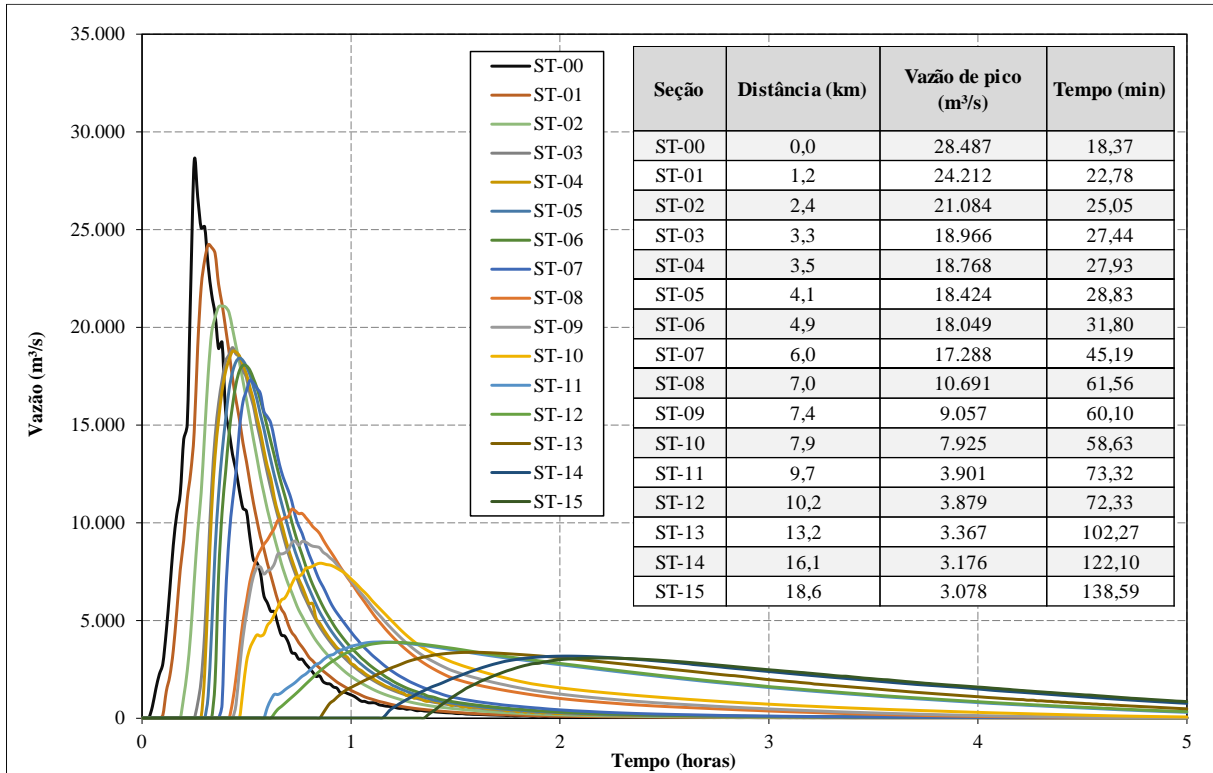
no trecho inicial. A partir da seção 8, ou seja, após a passagem pelo subdistrito de Bento Rodrigues, observa-se um maior decaimento dos hidrogramas que apresentam a reologia ou a incorporação do transporte de sedimentos. O tempo de chegada da onda, entretanto, é em geral menor no Cenário 1. Estes resultados encontram-se compatíveis aos resultados de Machado (2017), que destaca que nos fluidos com grande carregamento de partículas sólidas, uma menor velocidade observada resulta em um tempo superior para a profundidade máxima.

Figura 52 Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas – Cenário 1



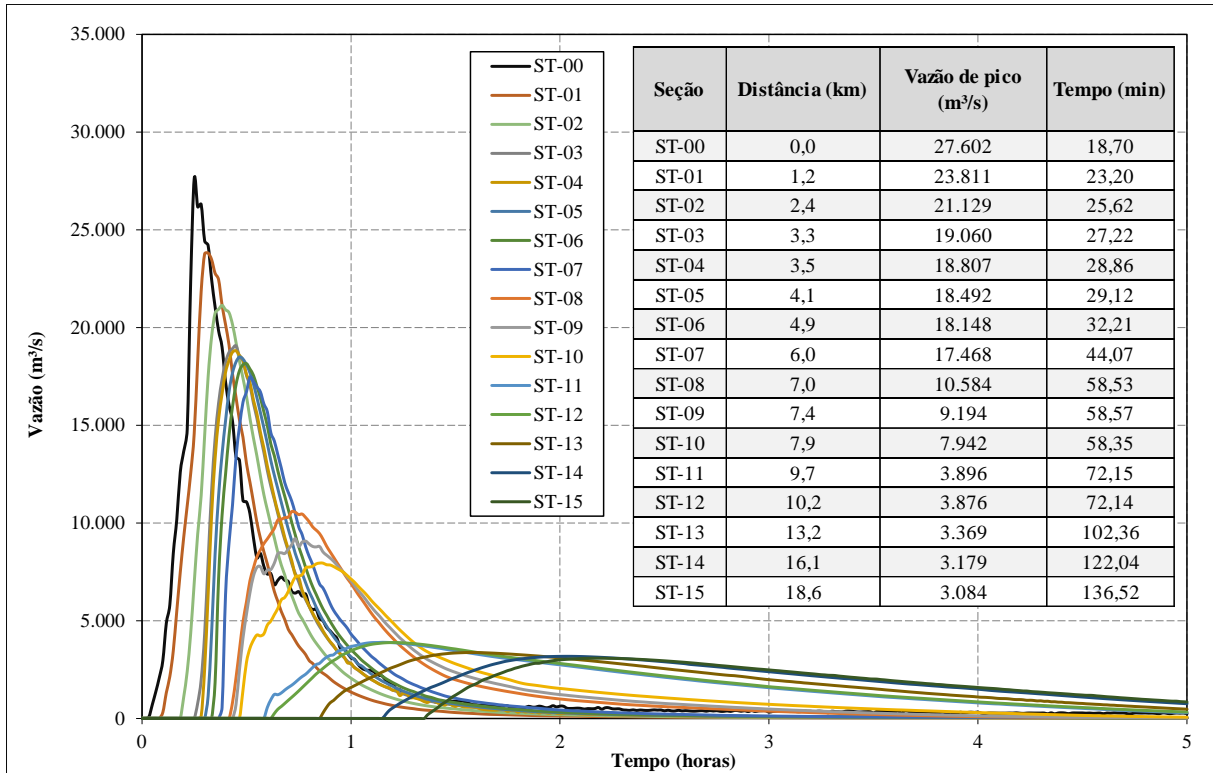
Fonte: Autora (2022)

Figura 53 É Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas É Cenário 2



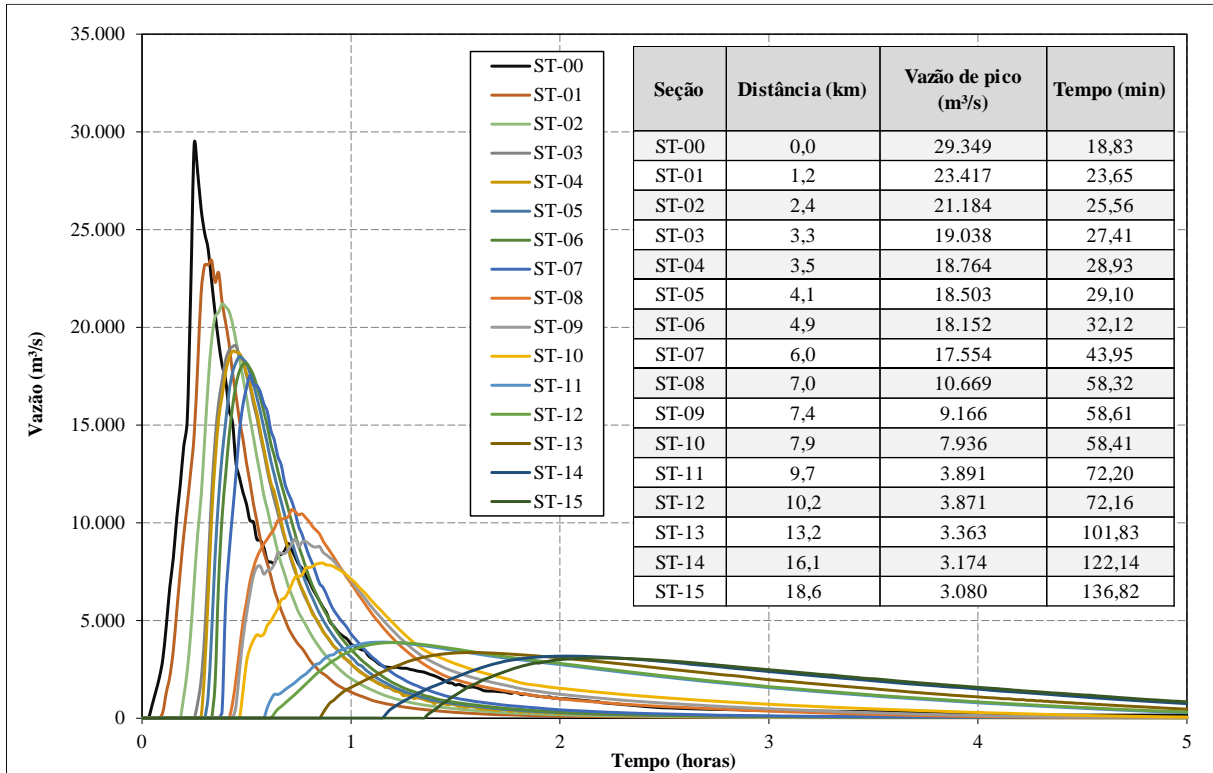
Fonte: Autora (2022)

Figura 54 É Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas É Cenário 3



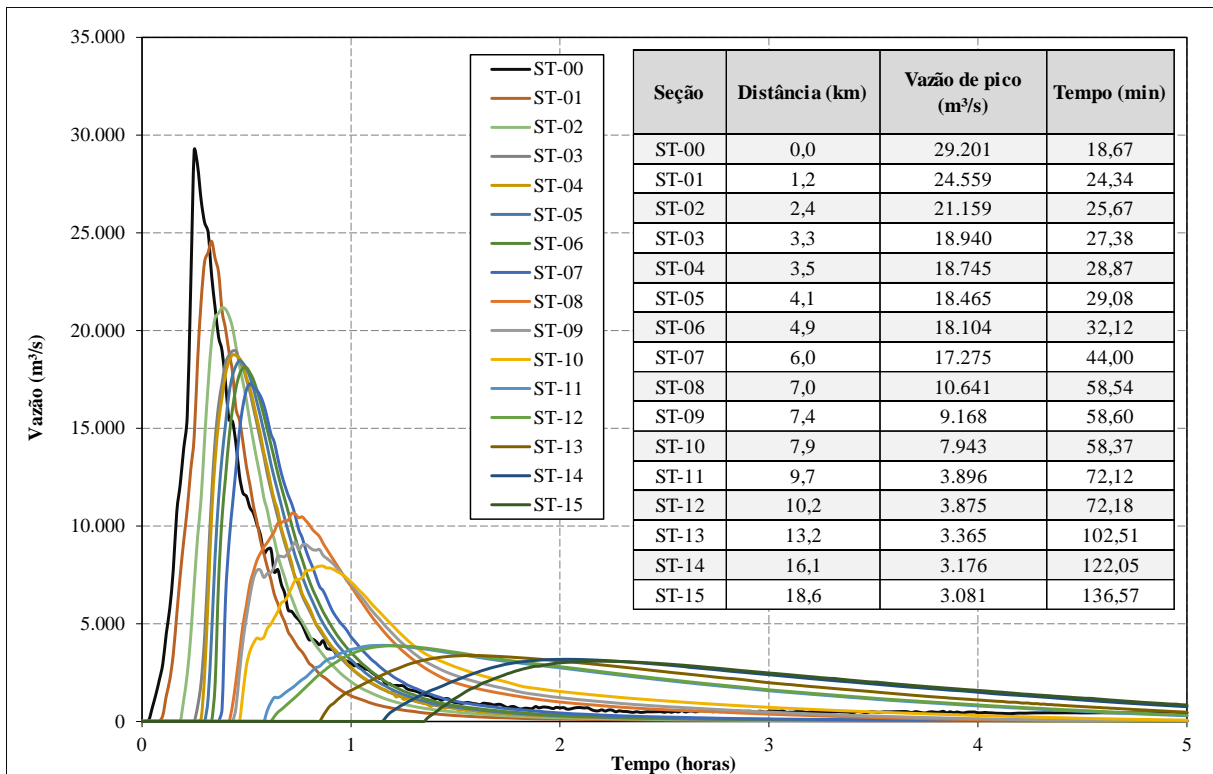
Fonte: Autora (2022)

Figura 55 É Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas É Cenário 4



Fonte: Autora (2022)

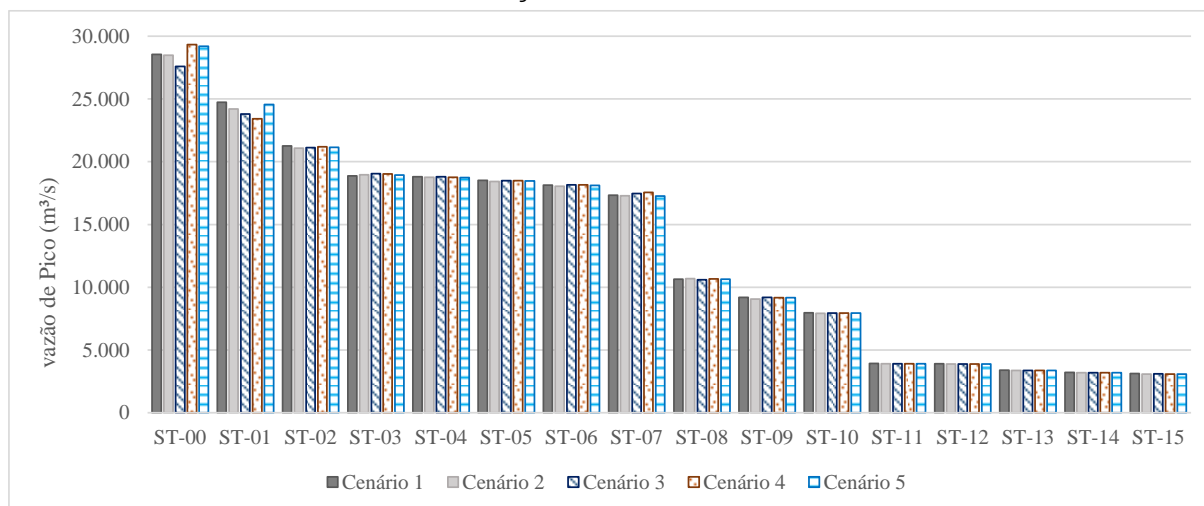
Figura 56 É Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas É Cenário 5



Fonte: Autora (2022)

As vazões de pico de cada um dos cenários avaliados, considerando-se 16 seções avaliadas, encontram-se compiladas na Figura 57, apresentada a seguir

Figura 57 Resultados de vazões máximas (m^3/s) atingidas no escoamento ao longo das seções de interesse



Fonte: Autora (2022)

O que se observa, na avaliação das vazões de pico ao longo das seções avaliadas, é que os resultados se mostraram muito pouco sensíveis a configuração hidráulica do cenário avaliado. A medida que a distância para jusante da barragem aumenta, começa-se a observar uma maior variação percentual no decaimento do pico nos cenários 2 a 5 em relação ao cenário 1, que corresponde ao fluido aquoso. No entanto, observa-se que, avaliando um trecho inicial muito próximo a estrutura, o esforço computacional gerado para a realização de modelagens mais robustas não se traduz em impactos nos resultados observados.

A partir dos 5 cenários de referência avaliados (conforme Tabela 11) foram compilados os respectivos mapas contendo as manchas de inundação resultantes. Estes mapas apresentam as manchas resultantes em relação a mancha real observada e se encontram apresentados no APÊNDICE B – MAPAS DE INUNDAÇÃO.

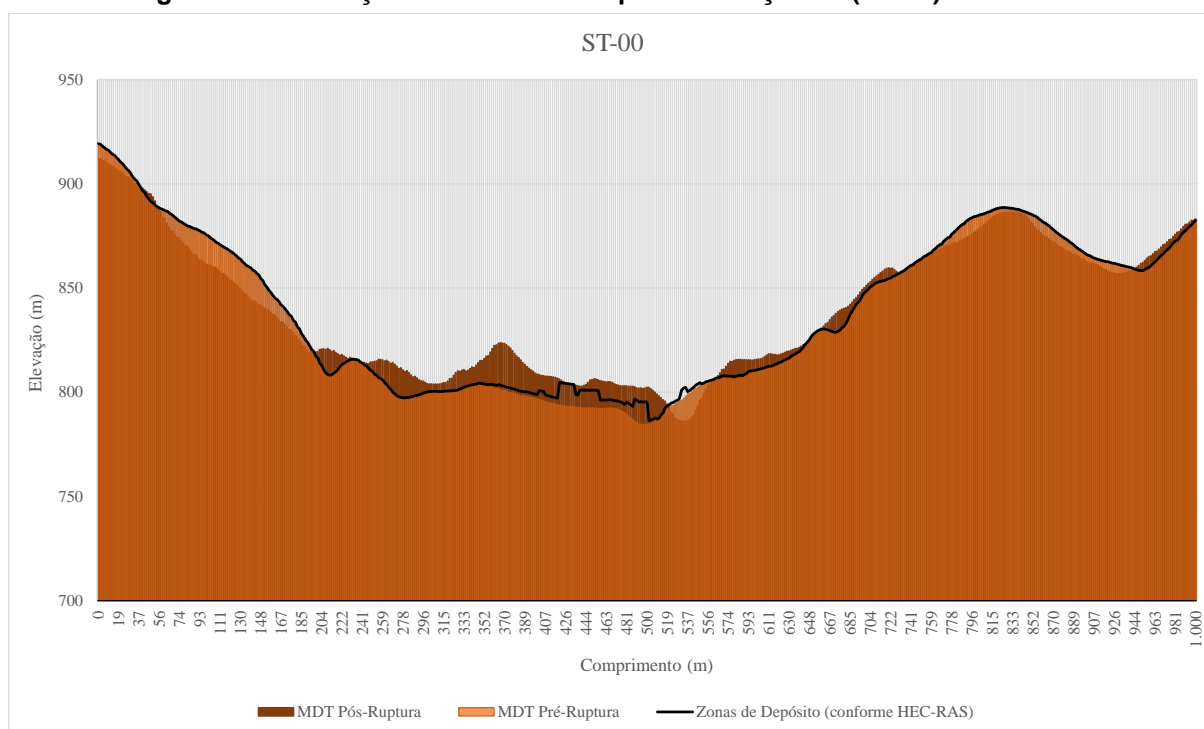
6.2 Avaliação das Zonas de Depósito

Um dos objetivos para a realização da modelagem do estudo de Ruptura Hipotética ou *Dam Break* com a incorporação do transporte de sedimentos, além da verificação do impacto nos parâmetros apresentados previamente no Item 6.1, consistia em

determinar a assertividade do modelo em prever as zonas de depósito ao longo do vale a jusante.

Conforme mencionado, no presente estudo adotou-se que o leito é fixo em função da dificuldade em se determinar parâmetros que possibilitem representar um leito móvel. Com isso, como as regiões de erosão não poderiam ser percebidas, o foco dos resultados apresentados é na avaliação das zonas de depósitos. A Figura 58 apresenta a comparação entre o terreno pré e pós ruptura, juntamente com a indicação da superfície final incorporando a deposição dos sedimentos, para o Cenário 3.

Figura 58 É Avaliação das zonas de depósito É Seção 00 (ST-00) É Cenário 3



Fonte: Autora (2022)

De forma similar ao ilustrado para a Seção 00 (ST-00) encontram-se apresentados em maiores detalhes, para todas as demais 15 seções transversais de referência do Cenário 3, o perfil com as variações do terreno antes e após a ruptura, com a respectiva variação resultante das modelagens, no APÊNDICE C – ZONAS DE DEPÓSITO.

A Tabela 16 apresenta uma compilação das maiores deposições observadas em cada uma das 16 seções transversais de referência, considerando-se os Cenários 3, 4 e 5.

Destaca-se que os valores observados foram determinados com base na região da calha do rio, sendo os locais sem informação os locais nos quais foi observado erosão da calha principal.

Tabela 16 Zonas de depósito e Valores máximos de deposição (m) ao longo das seções transversais

Seção	Alteração do leito(m)			Observada
	HEC-RAS			
	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	
ST-00	12,918	14,824	15,164	22,543
ST-01	0,142	0,151	0,056	5,807
ST-02	0,002	0,003	0,003	4,12
ST-03	1,107	1,46	1,351	1,737
ST-04	0,001	0,004	-	-
ST-05	-	-	-	-
ST-06	0,107	0,104	0,074	-
ST-07	0,090	0,128	0,083	3,236
ST-08	0,25	0,307	0,268	-
ST-09	0,311	0,207	0,088	1,563
ST-10	0,375	0,295	0,554	2,995
ST-11	-	-	-	7,141
ST-12	0,001	0,001	-	5,625
ST-13	0,124	0,032	0,001	2,05
ST-14	0,002	0,002	-	0,383
ST-15	0,034	0,042	0,001	1,016

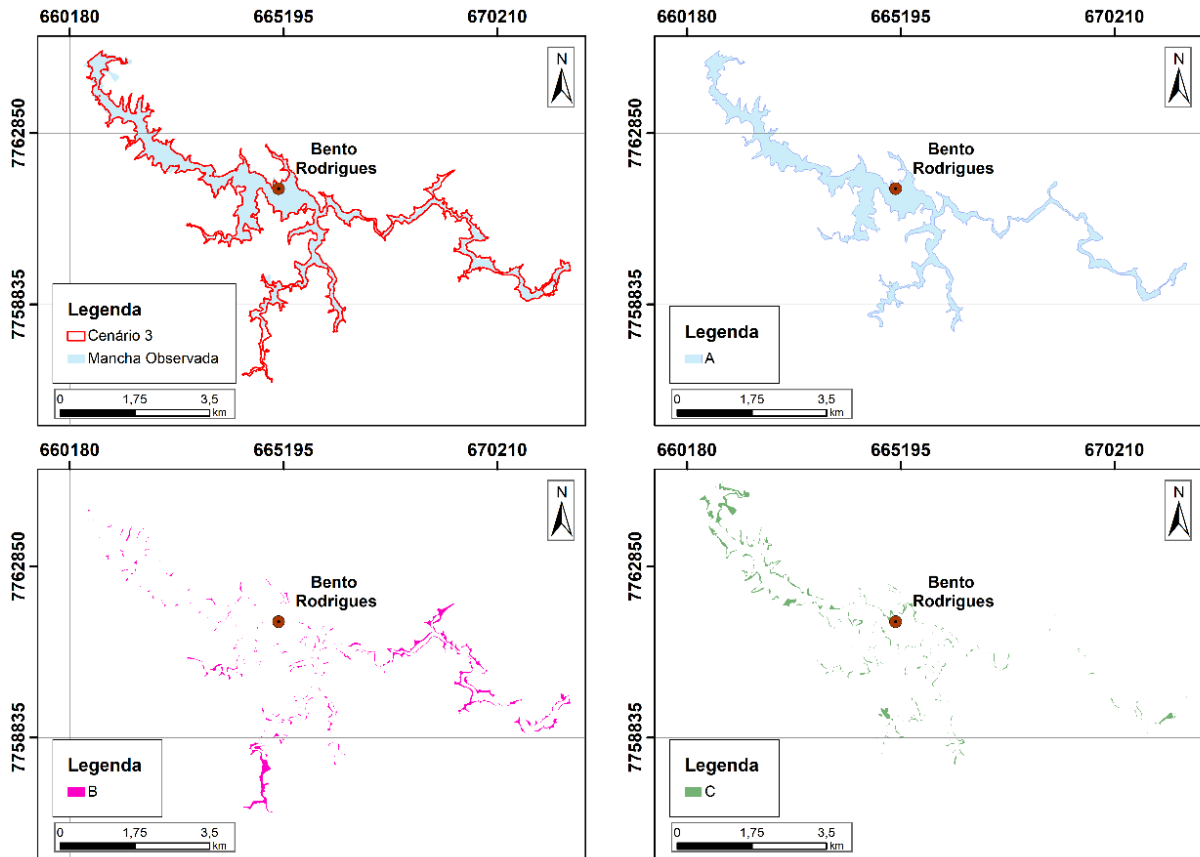
Fonte: Autora (2022)

A partir dos resultados observa-se que, embora a simulação possa dar uma direção da deposição esperada após a ocorrência de uma ruptura, os valores não estão muito próximos dos valores reais observados. As seções cujos resultados obtidos mais se aproximaram daqueles observados foram as seções ST-03, cujo valor na modelagem correspondeu a cerca de 84% do observado quando considera-se o Cenário 4, e a seção ST-00, cuja correspondência foi de cerca de 67% quando considera-se o Cenário 5.

6.3 Avaliação de Desempenho da Simulação Hidráulica

A Figura 59 exemplifica os resultados relativos a combinação binária para os cenários avaliados, a partir da qual realiza-se o cálculo dos índices de desempenho F. Salienta-se que, conforme ratificado por Rocha (2015), não necessariamente a obtenção de um alto índice de desempenho F está relacionado a uma boa calibração do modelo hidráulico, sendo mais recomendável que as calibrações sejam realizadas com base em fatores além da extensão da mancha, como a partir de níveis de água observados e previstos ao longo da inundação.

Figura 59 Combinação e classificação binária Simulação Cenário 3 Fluido aquoso com inserção dos parâmetros de transporte de sedimentos



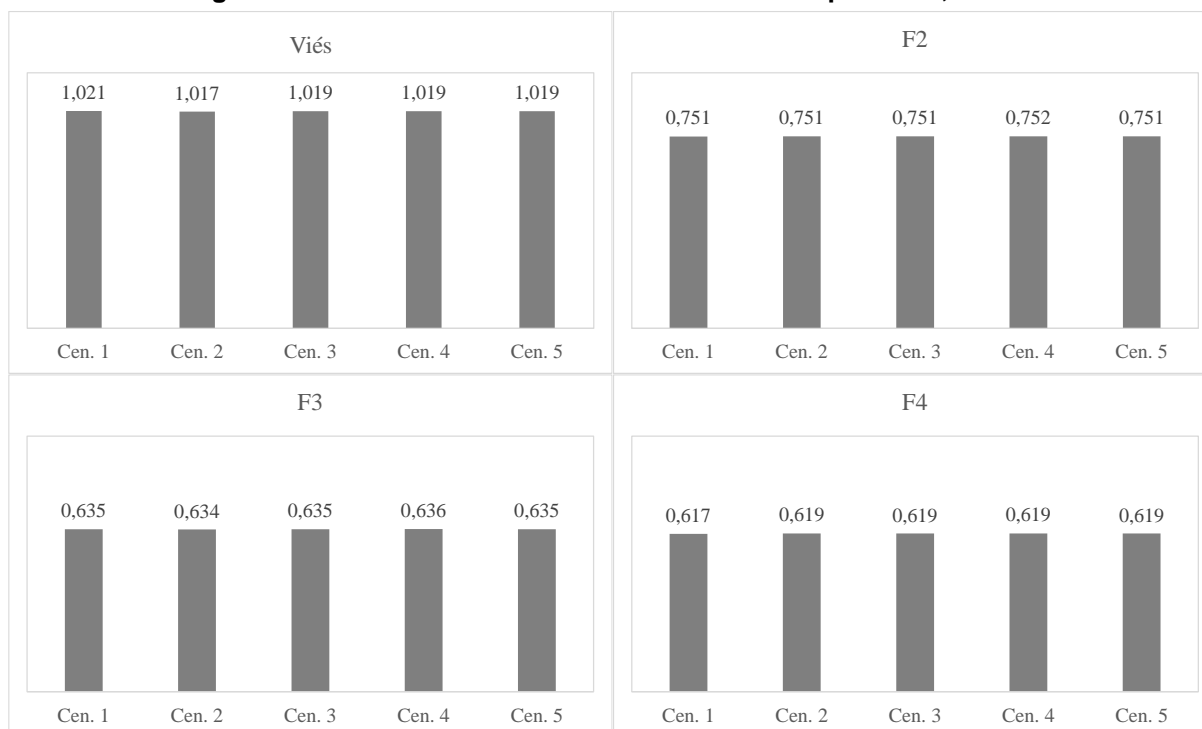
Fonte: Autora (2022)

Os resultados dos valores obtidos pelo cálculo para o viés e os índices de desempenho (F^2 , F^3 e F^4) estão apresentados na Figura 60. Estes resultados estão apresentados para os 5 cenários avaliados e constituem uma comparação entre a mancha real observada e cada uma das respectivas manchas resultantes das simulações hidráulicas realizadas. A Tabela 17 compila a finalidade de cada um dos parâmetros de referência.

Tabela 17 Índices de desempenho Descrição dos valores

Parâmetro	Intervalo de valores	Descrição
Viés	$(0, \infty)$ –Previsão correta:1	Balanco entre sub e superestimativa
F^2	$(0,1)$	Índice de sucesso crítico
F^3	$(-1,1)$	Penaliza subestimativa
F^4	$(-1,1)$	Penaliza superestimativa

Fonte: Machado (2017)

Figura 60 É Resultados do viés e fatores de desempenho F², F³ e F⁴

Fonte: Autora (2022)

Observa-se que os valores estão em todos os casos contidos dentro do intervalo de referência a que o índice se propõe e são muito próximos na comparação entre os cenários avaliados. Salienta-se que, conforme indicado na Tabela 17, o valor para a previsão correta é 1, sendo que os resultados apontam que o índice que mais se afastou desse valor ideal foi o F⁴ e, portanto, de maneira geral observou-se uma tendência à superestimação da mancha de inundação.

Ressalta-se que, embora a tendência geral da mancha seja a superestimação em relação à mancha real observada, este resultado deve ser analisado com cuidado. Ao observamos a Figura 59 temos que o conjunto B, que se refere ao presente no modelo mas ausente na observação (Tabela 7), trata-se em grande parte de uma superestimação em regiões de bordas mais extremas da mancha de inundação.

6.4 Avaliação da Demanda Computacional

Destaca-se que um dos grandes desafios relacionados à realização das modelagens com a inclusão dos parâmetros de transporte de sedimentos residiu em atingir a convergência nos modelos hidráulicos. Dessa forma, diante da grande dificuldade em realizar as simulações, que demandaram um esforço computacional cerca de 25

vezes maior, em termos de tempo computacional, salienta-se que foram realizados testes que no lugar de usar a equação mais completa de Águas Rasas (*Shallow Water Equation* – SWE), utilizou a abordagem simplificada para a modelagem da propagação do escoamento pautada na aplicação da equação de Onda Difusiva (*Diffusion Wave*).

A Tabela 18, apresentada a seguir, indica a configuração mínima requerida pelo software HEC-RAS frente às configurações de duas máquinas base utilizadas nas simulações. A máquina 1 corresponde a diferentes máquinas virtuais que foram criadas de forma a auxiliar a realização de múltiplas simulações, em função do longo tempo que os cenários que continham o transporte de sedimentos demandavam. Estes utilizavam cerca de 250 horas para completar uma simulação de 5 horas de modelagem, ao passo que os cenários aquoso e hiperconcentrado necessitavam de no máximo 10 horas para uma simulação similar. As observações realizadas levam a crer que a dificuldade de convergência dos modelos com a inserção dos parâmetros de transporte de sedimentos não foram provenientes de limitações de *hardware*.

Tabela 18 É Comparativo entre configurações computações

	Máquina 1	Máquina 2	Recomendações HEC-RAS
Processador	Xeon (R) 4 núcleos / 8 threads	Ryzen 5 2600 6 núcleos / 12 threads	I5 4 núcleos / 8 threads ou superior (não especifica geração)
Ram	32GB	16GB	8GB no mínimo
Armazenamento	SSD /100GB	SSD / 240GB + HDD / 1 TB	1 GB disponível
Sistema	Windows 10 Server 2019	Windows 10 Pro 2016	Windows 7 ou superior
Placa de vídeo	N/A	Rx570 8GB	Nenhuma

Fonte: Autora (2022)

Os cenários avaliados, a partir desta simplificação, consideraram os cenários de forma similar ao já apresentado, mas, no entanto, os cenários com a incorporação do transporte de sedimentos consideram o fluido hiperconcentrado, conforme apresentado na Tabela 19. Vale ressaltar que estes resultados a seguir são apresentados unicamente a título de comparação e em face à dificuldade da convergência dos modelos contendo o transporte de sedimentos, não sendo indicado para a realização de estudos de *Dam Break* a adoção de tal simplificação.

Tabela 19 – Cenários avaliados

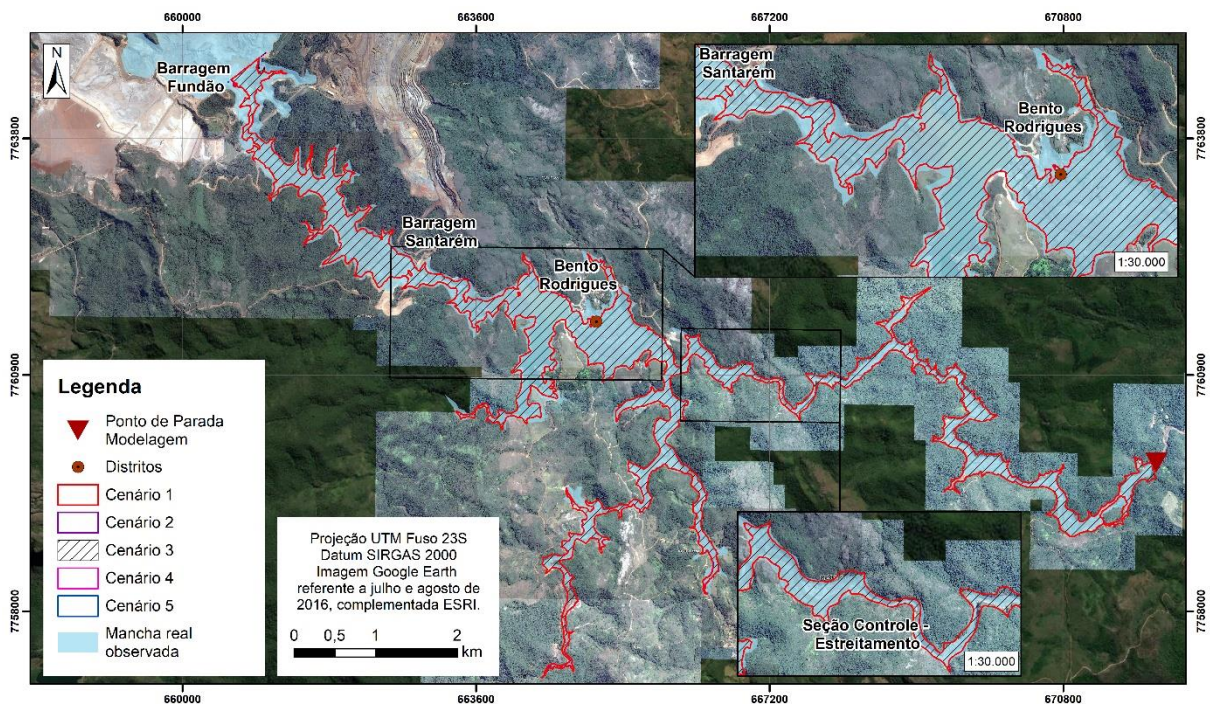
Modelo Hidráulico	Cenário	Fundo	Tipo de Fluido
HEC RAS	1	Leito fixo	Aquoso
	2		Hiperconcentrado
	3		Hiperconcentrado com a incorporação dos parâmetros de transporte de sedimentos (Equação Transporte de Soulsby-Van Rijn)
	4		Idem Cenário3 (Eq. Transporte de Van Rijn)
	5		Idem Cenário3 (Eq. Transporte de Wu)

Fonte: Autora (2022)

Salienta-se que os cenários 3 a 5 consideraram o fluido hiperconcentrado com a inserção do transporte de sedimentos. Essa construção também foi realizada em função da convergência do modelo. A Figura 61 apresenta as envoltórias de inundação entre os cenários. As áreas inundadas corresponderam respectivamente a 4.809.071 m² (Cenário 1), 4.795.999 m² (Cenário 2), 4.807.319 m²(Cenário 3), 4.804.848 m² (Cenário 4) e 4.806.777 m² (Cenário 5).

Destaca-se que de forma similar aos resultados apresentados anteriormente, o Cenário 1 possuiu a maior área inundada ao passo que o Cenário 2 apresentou a menor área inundada, sendo a diferença percentual também de apenas 0,3%.

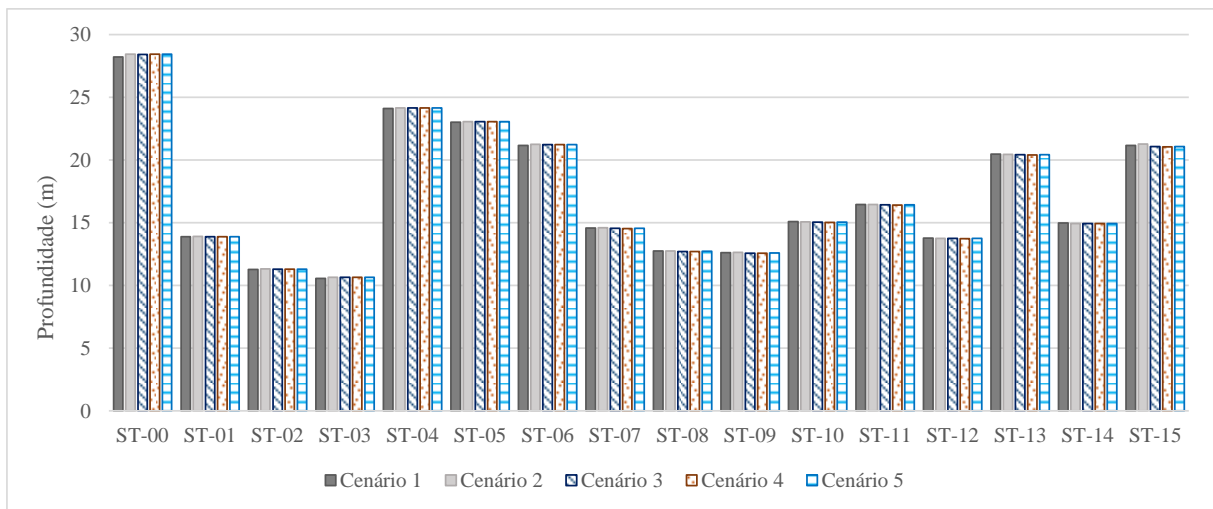
Figura 61 – Mancha de inundação resultante da Avaliação do rompimento da Barragem de Fundão – Comparação entre os cenários avaliados



Fonte: Autora (2022)

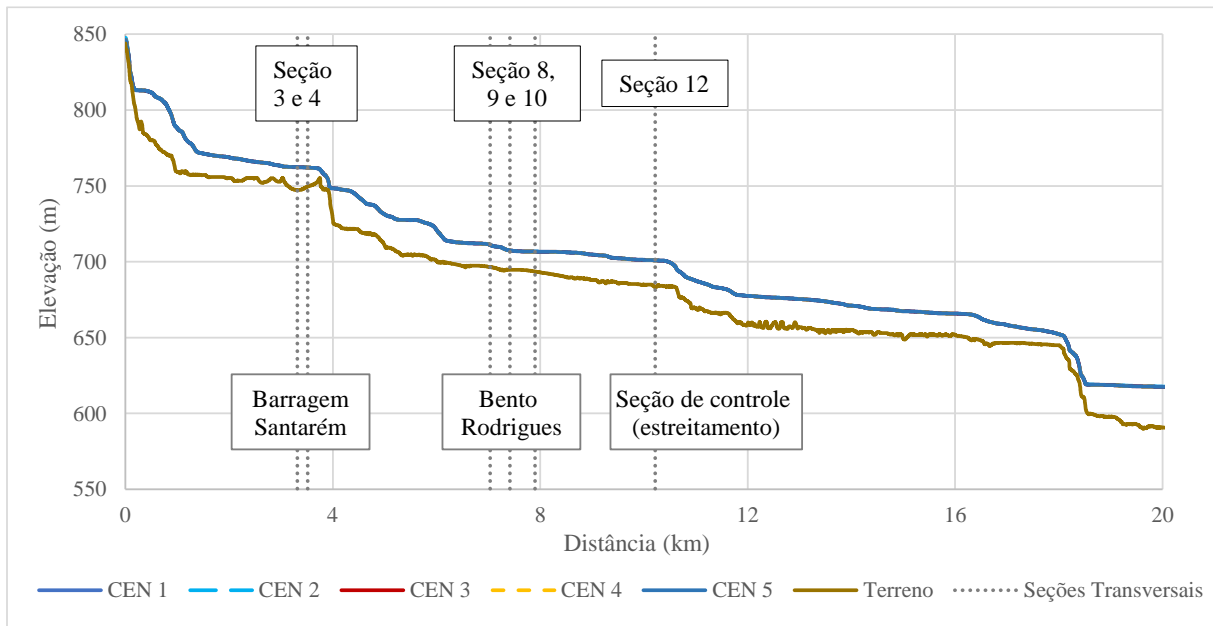
A profundidade máxima do escoamento é apresentada na Figura 62. Na sequência, na Figura 63, é apresentado o perfil com a variação das elevações em relação ao eixo do curso da água a jusante da Barragem de Fundão. Da mesma forma que nos resultados previamente apresentados, verifica-se que a variação das profundidades nos primeiros quilômetros após a barragem é muito próxima quando considera-se o fluido aquoso, hiperconcentrado ou com a incorporação do parâmetro de transporte de sedimentos.

Figura 62 - Resultados de profundidades máximas (m) no escoamento ao longo das seções de interesse



Fonte: Autora (2022)

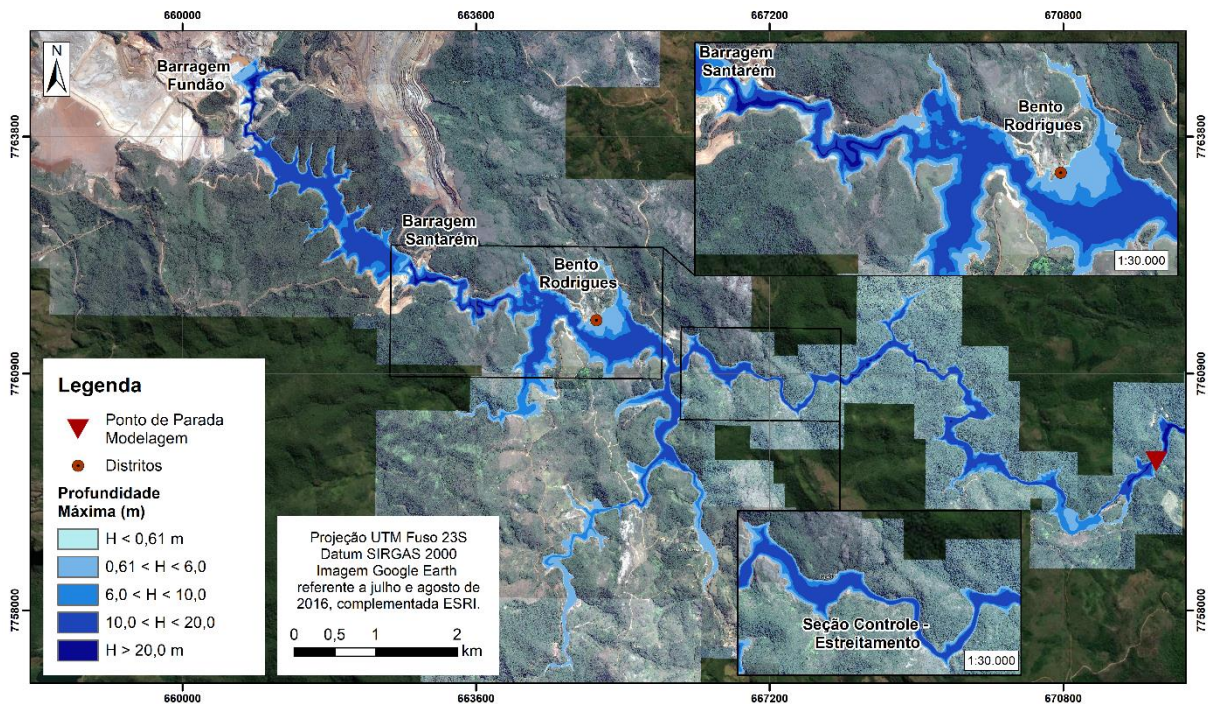
Figura 63 É Avaliação da variação de elevação (m) ao longo das seções de interesse



Fonte: Autora (2022)

Na Figura 64 observa-se que a profundidade máxima oscilou bastante, principalmente em decorrência de trechos encachoeirados, da mesma forma que anteriormente destacado. No entanto, observou-se que para a região relativa ao subdistrito de Bento Rodrigues chegou-se a valores de profundidades máximas inferiores aos anteriores e, portanto, este representa uma condição menos favorável à segurança. É apresentado de forma ilustrativa apenas o resultado relativo ao Cenário 3.

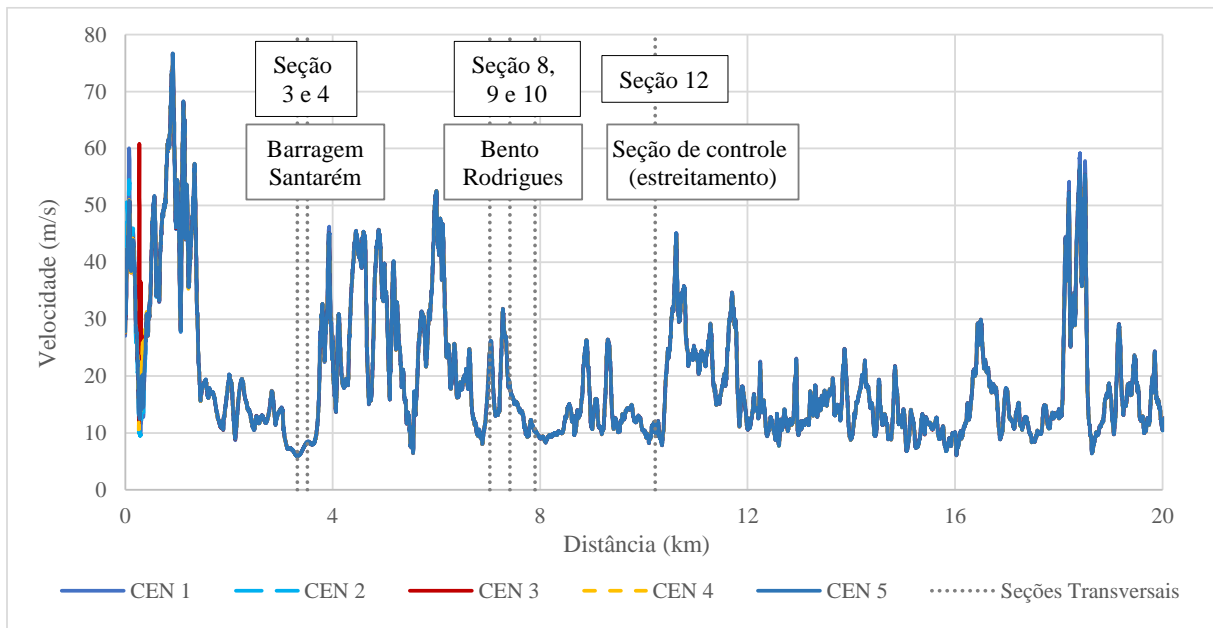
Figura 64 - Máximas profundidades de escoamento Ë Cenário 3



Fonte: Autora (2022)

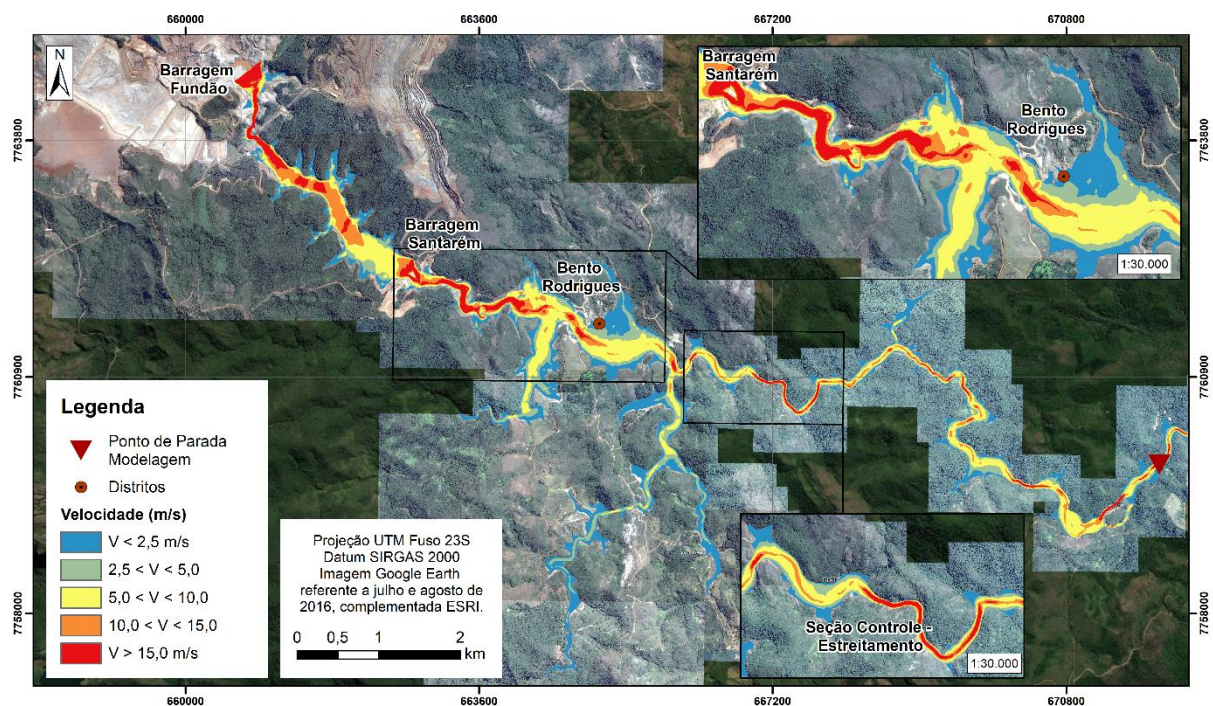
Em termos de velocidades máximas (Figura 65) observa-se que as velocidades foram significativamente mais altas que às observadas anteriormente. Enquanto as médias de velocidades máximas anteriores eram da ordem de 8,1 m/s, agora este valor é da ordem de 18,9 m/s. A Figura 66 apresenta a variação geral das velocidades máximas para o Cenário 3.

Figura 65 É Avaliação da variação de velocidade (m/s) ao longo das seções de interesse



Fonte: Autora (2022)

Figura 66 É Máximas velocidades de escoamento É Cenário 3

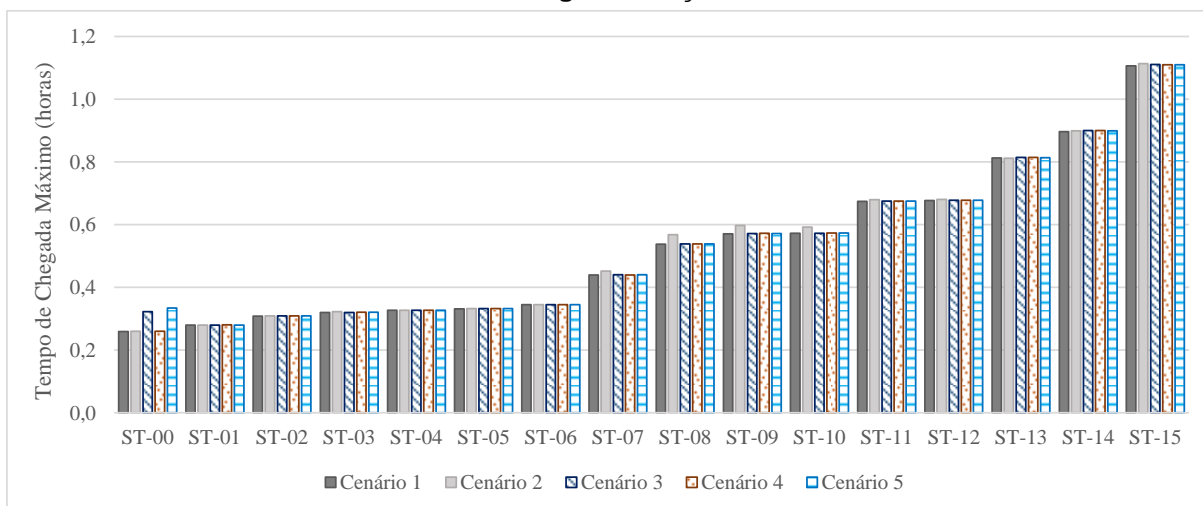


Fonte: Autora (2022)

O tempo para a máxima profundidade é apresentado na Figura 67. De forma similar às avaliações anteriores, embora tenham sido verificadas pequenas variações do tempo entre os cenários, os valores são no geral muito próximos. A Figura 68 apresenta o tempo de chegada da onda de ruptura associada ao tempo necessário para que se observe um nível de água equivalente a 0,61 metros (2 pés). Esse

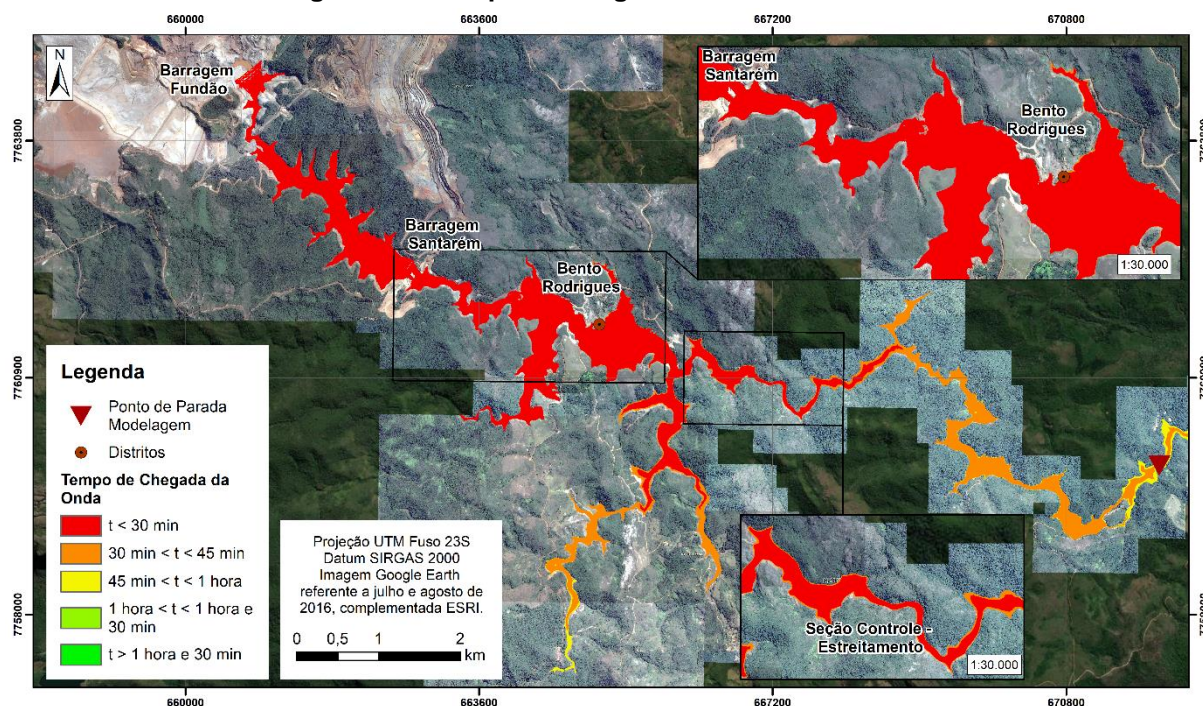
resultado apresentado para o tempo de chegada da onda se mostra muito mais crítico nesta configuração.

Figura 67 Resultados de tempo de chegada (horas) para as profundidades máximas no escoamento ao longo das seções de interesse



Fonte: Autora (2022)

Figura 68 Tempo de chegada da onda – Cenário 3

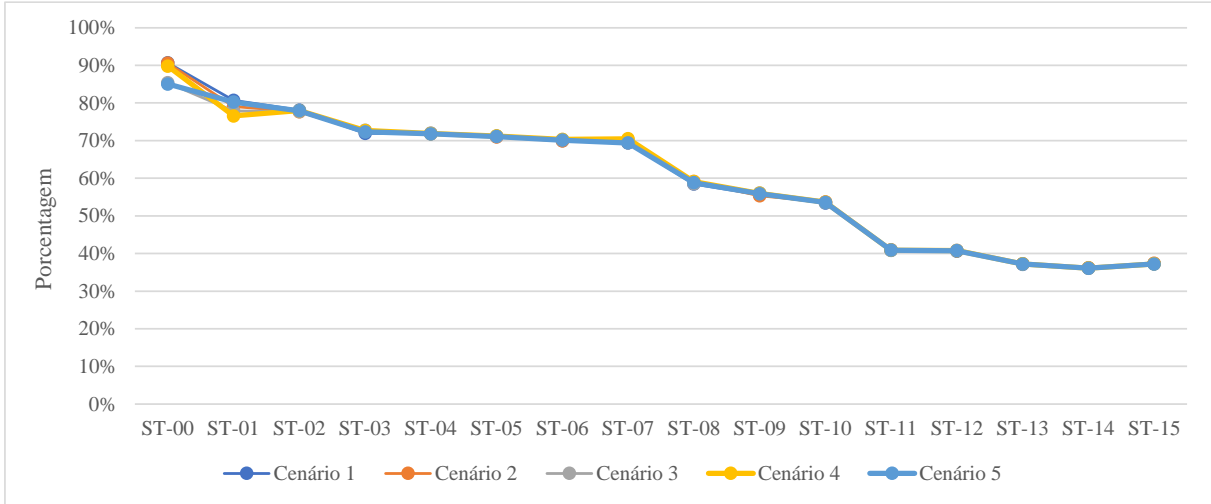


Fonte: Autora (2022)

O mesmo ocorre para os hidrogramas, apresentados a seguir na Figura 70 até a Figura 74, nos quais é possível observar uma atenuação de vazões muito inferior ao apresentado anteriormente. Considerando-se de exemplo a última seção transversal de referência, a ST-15, destaca-se que o valor de vazão de pico anterior corresponde

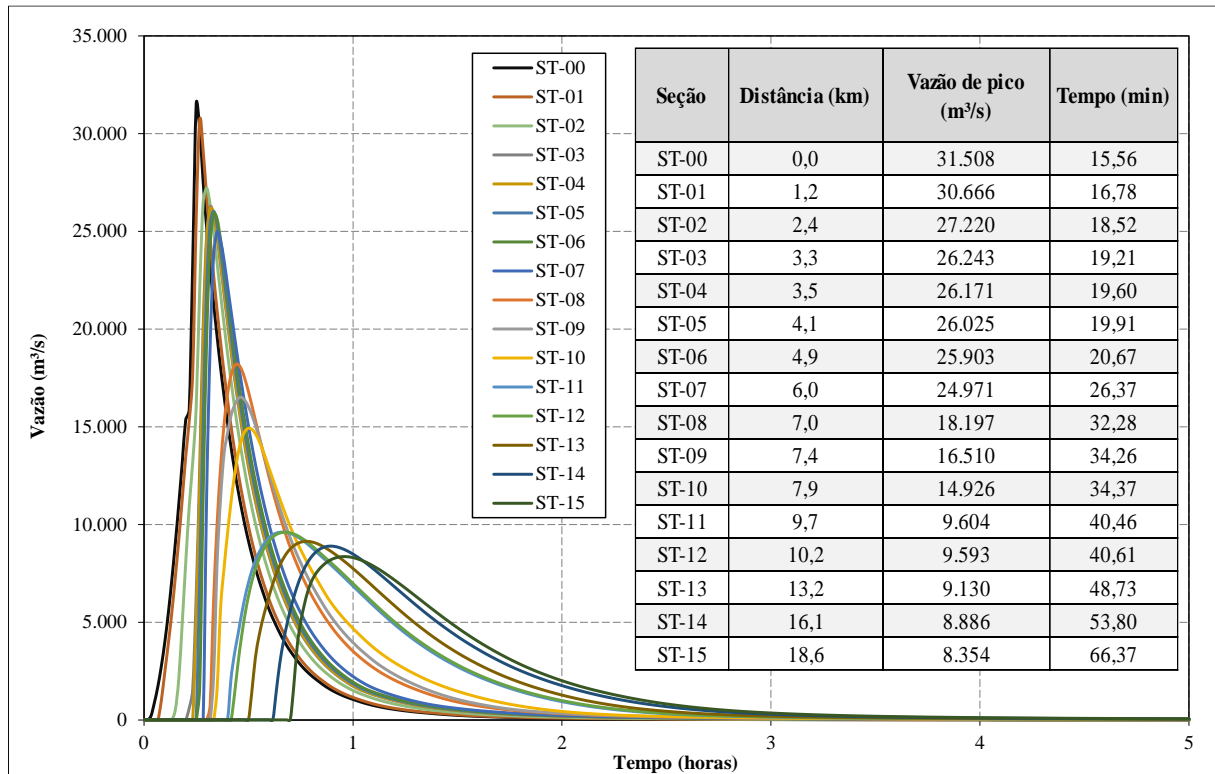
a 37% do valor de pico apresentado a seguir. A Figura 69 apresenta a variação em termos percentuais para as demais seções, considerando-se os Cenários 1 a 5.

Figura 69 É Variação percentual entre as vazões de pico É Cenários 1 a 5



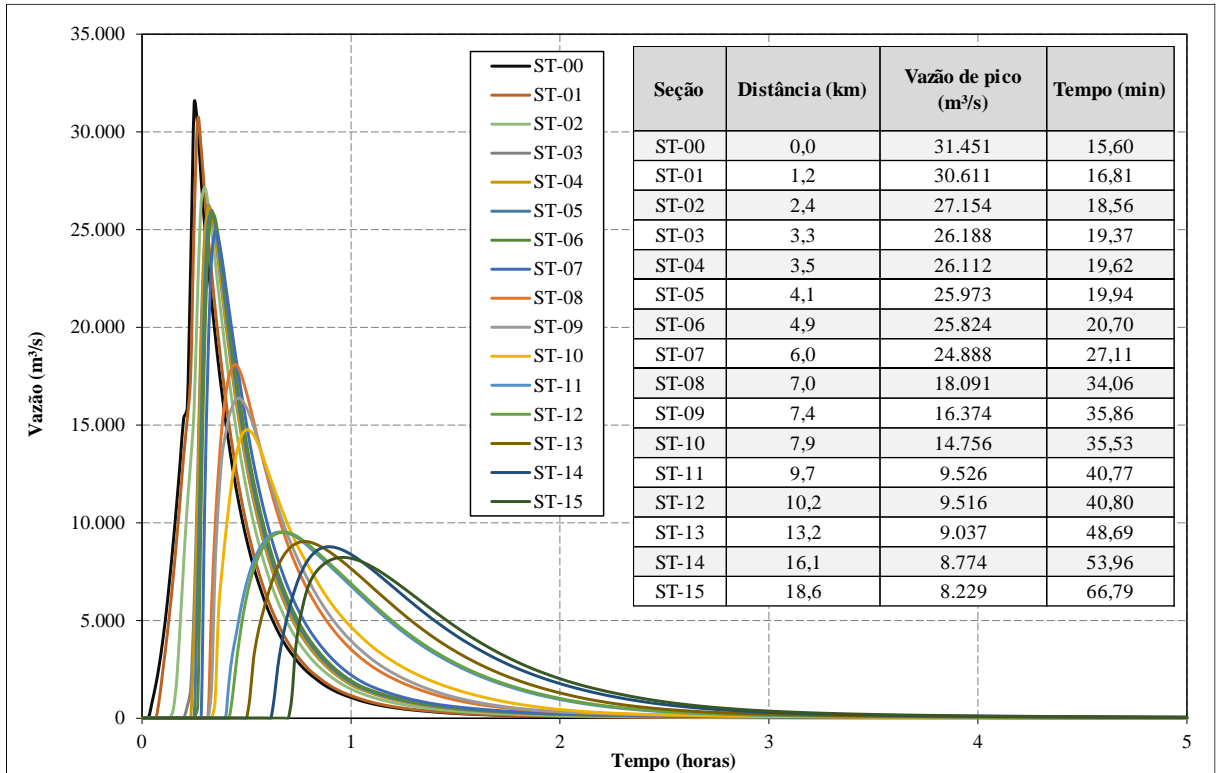
Fonte: Autora (2022)

Figura 70 É Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas É Cenário 1



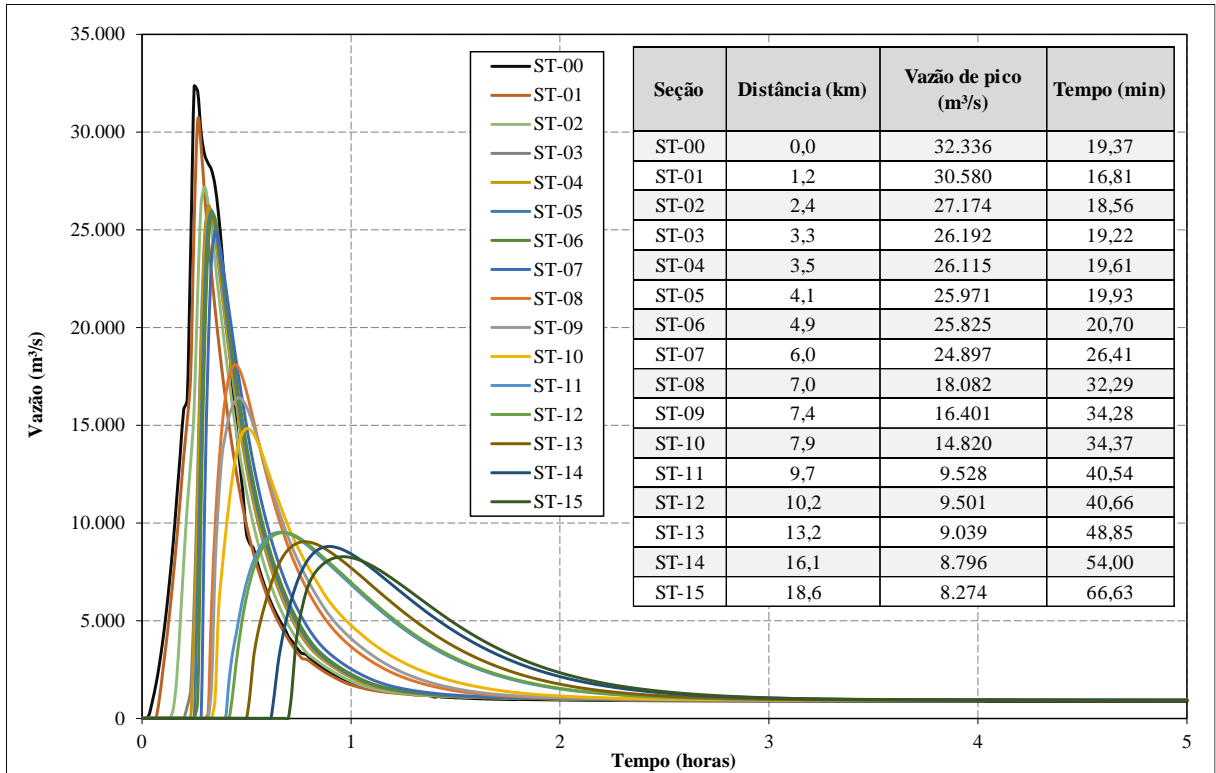
Fonte: Autora (2022)

Figura 71 É Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas É Cenário 2



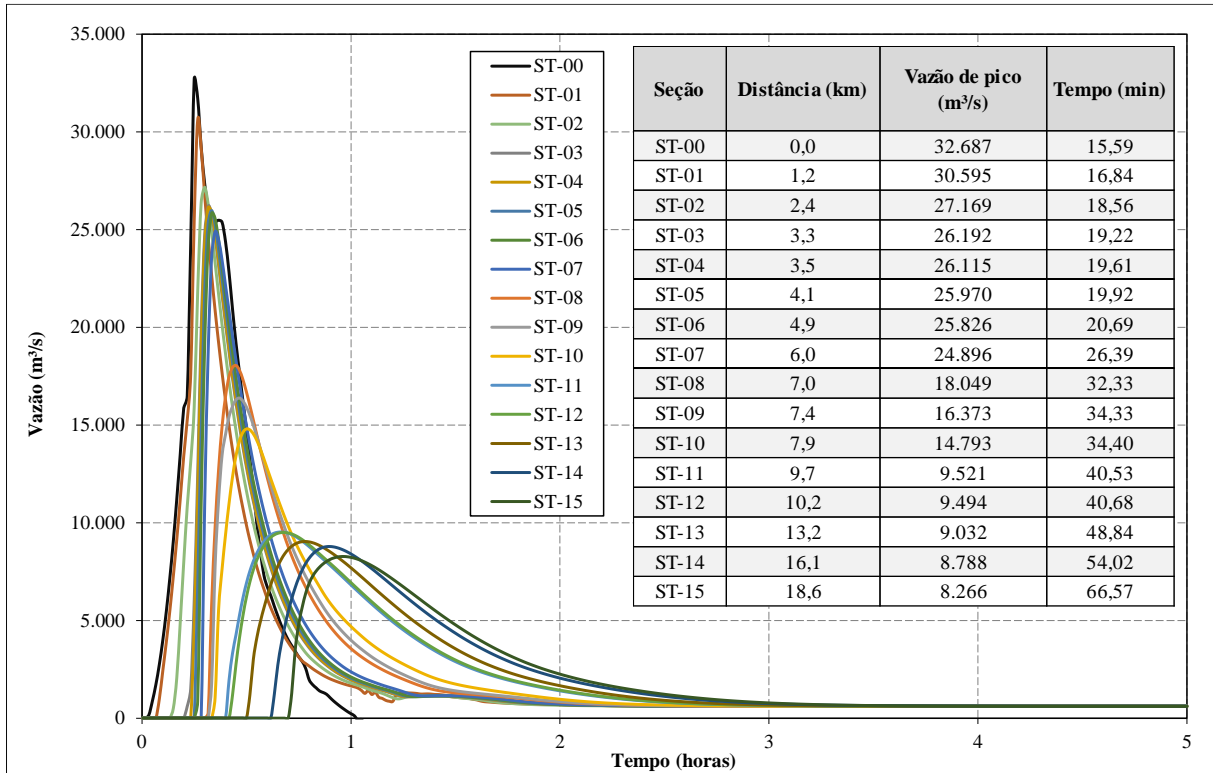
Fonte: Autora (2022)

Figura 72 É Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas É Cenário 3



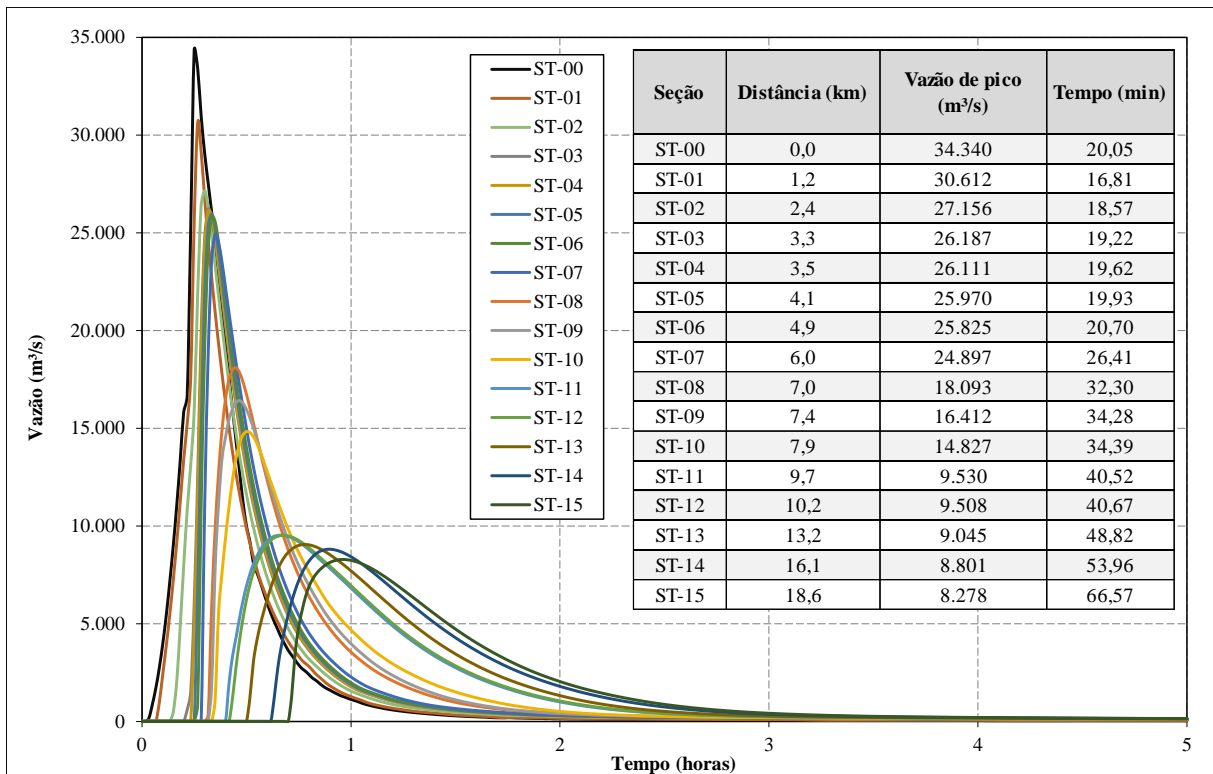
Fonte: Autora (2022)

Figura 73 Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas - Cenário 4



Fonte: Autora (2022)

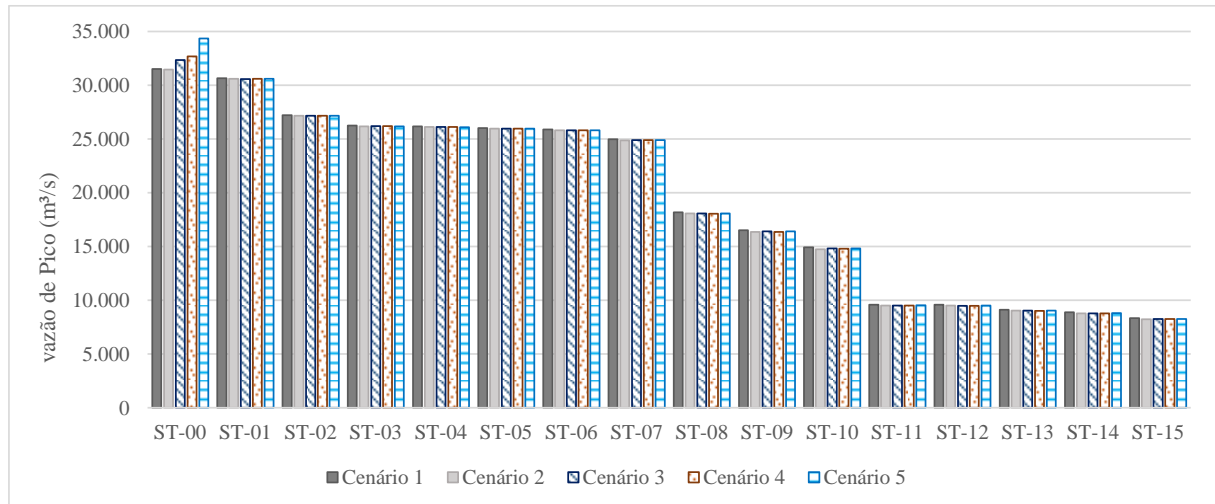
Figura 74 Atenuação do hidrograma ao longo das seções avaliadas - Cenário 5



Fonte: Autora (2022)

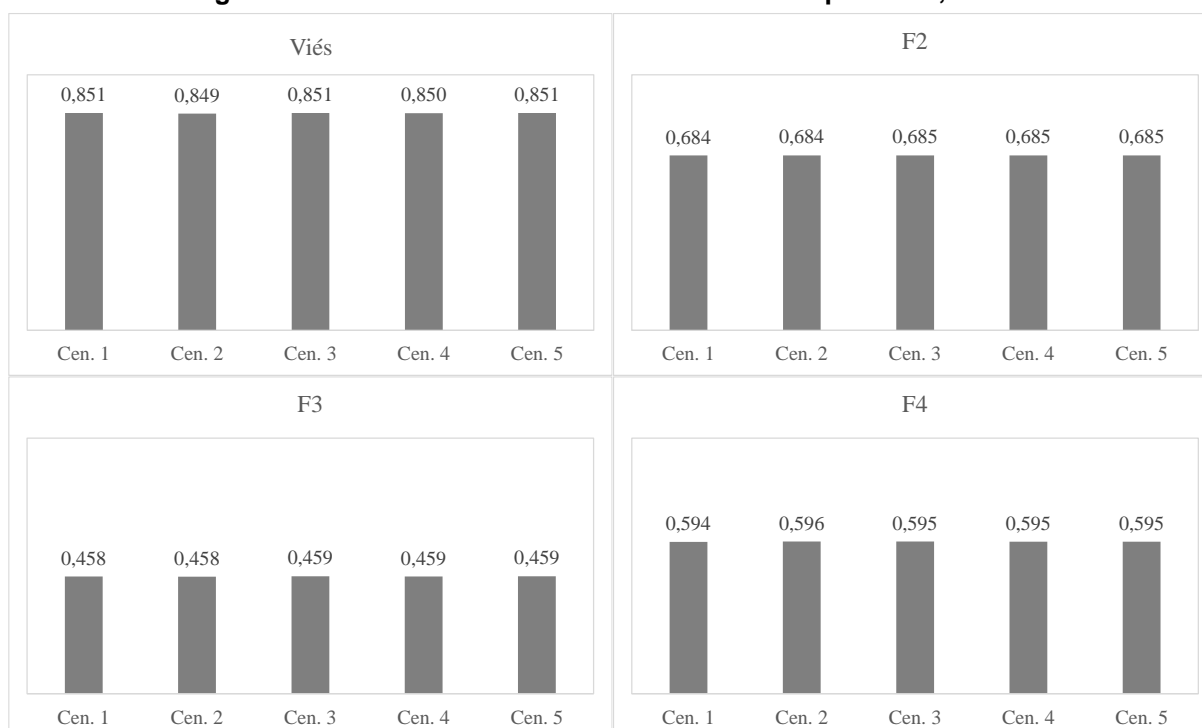
As vazões de pico de cada um dos cenários avaliados, considerando-se 16 seções avaliadas, encontram-se compiladas na Figura 75, apresentada a seguir.

Figura 75 Resultados de vazões máximas (m³/s) atingidas no escoamento ao longo das seções de interesse



Fonte: Autora (2022)

Em relação à análise dos índices de desempenho F observa-se que essa configuração apresentou resultados mais distantes do valor ideal 1, sendo que neste caso o índice com maior peso foi o F^3 e, portanto, de maneira geral observou-se uma tendência à subestimação da mancha de inundação, o que é o contrário do observado anteriormente. A Figura 76 apresenta em detalhes os resultados dos valores obtidos pelo cálculo para o viés e os índices de desempenho (F^2 , F^3 e F^4).

Figura 76 - Resultados do viés e fatores de desempenho F², F³ e F⁴

Fonte: Autora (2022)

De forma resumida a Tabela 20 apresenta uma compilação dos principais parâmetros avaliados em cada uma das 16 seções transversais de referência. Os resultados indicados como SWE se referem a equação mais completa de Águas Rasas (*Shallow Water Equation*), ao passo que o DW corresponde a equação simplificada de Onda Difusiva (*Diffusion Wave*).

Tabela 20 É Comparativo entre as simulações realizadas com SWE ou DW

Seção	Distância (km)	Profundidade (m)		Velocidade (m/s)		Tempo de Chegada (min)		Vazão de Pico (m ³ /s)	
		SWE	DW	SWE	DW	SWE	DW	SWE	DW
ST-00	0,0	47,42	28,41	10,44	24,14	2,00	2,00	27.601	32.336
ST-01	1,2	16,96	13,89	19,41	19,86	6,00	5,00	23.811	30.579
ST-02	2,4	15,03	11,30	12,26	14,97	12,00	9,00	21.128	27.173
ST-03	3,3	14,60	10,64	7,67	13,21	16,00	13,00	19.060	26.191
ST-04	3,5	34,36	24,14	15,08	29,98	17,00	14,00	18.807	26.115
ST-05	4,1	30,80	23,05	13,01	43,73	19,00	16,00	18.492	25.970
ST-06	4,9	27,54	21,23	18,76	32,98	21,00	16,00	18.147	25.825
ST-07	6,0	16,99	14,55	10,95	23,09	23,00	18,00	17.467	24.897
ST-08	7,0	14,98	12,71	12,26	19,31	26,00	19,00	10.584	18.081
ST-09	7,4	15,50	12,58	8,80	10,77	27,00	20,00	9.193	16.401
ST-10	7,9	18,03	15,04	6,16	10,06	29,00	21,00	7.941	14.819
ST-11	9,7	20,01	16,42	5,72	9,50	36,00	25,00	3.896	9.527
ST-12	10,2	16,61	13,74	9,18	37,60	38,00	26,00	3.876	9.500
ST-13	13,2	23,44	20,42	5,04	18,24	52,00	31,00	3.368	9.038
ST-14	16,1	15,12	14,94	8,54	27,99	70,00	38,00	3.178	8.796
ST-15	18,6	17,69	21,06	5,46	18,11	82,00	43,00	3.084	8.274

Fonte: Autora (2022)

Apenas a título de ilustração, apresentou-se no APÊNDICE D os mapas correspondentes aos 5 cenários de referência, mas, no entanto, que haviam sido simulados através da abordagem simplificada para a modelagem da propagação do escoamento pautada na aplicação da equação de Onda Difusiva (*Diffusion Wave*).

7 CONCLUSÕES

A partir da realização dos estudos de ruptura da Barragem de Fundão, considerando-se a incorporação do transporte de sedimentos na modelagem hidrodinâmica, esperava-se uma quantificação das diferenças na incorporação deste parâmetro na simulação de ruptura de barragens, como uma forma de buscar aproximar ainda mais os modelos simulados aos eventos reais observados. Os resultados obtidos entretanto apontam que, ao avaliar-se os primeiros quilômetros a jusante de uma ruptura, a configuração do modelo hidráulico, no que concerne ao tipo de fluido propagado, não resulta em grandes alterações nas variáveis hidrodinâmicas.

Para a realização do presente estudo foram construídos 5 cenários distintos que foram simulados no HEC-RAS v 6.1. Estes cenários buscaram avaliar a propagação de um fluido apenas aquoso (Cenário 1), um fluido hiperconcentrado (Cenário 2) e um fluido aquoso com a incorporação dos parâmetros de transporte de sedimentos (Cenários 3 a 5). Nestes últimos foram utilizadas 3 equações da literatura para o transporte de sedimentos, de forma a avaliar a que apresentaria os resultados mais aderentes. Para a realização das simulações foi utilizada uma base topográfica disponibilizada pela Samarco Mineração, convertida em um MDT com resolução espacial de 1,5 metros. Em termos de definição dos parâmetros geotécnicos, reológicos e sedimentológicos dos rejeitos, utilizou-se como base os resultados dos estudos desenvolvidos por Machado (2017).

Conforme mencionado, para os parâmetros avaliados, tais como mancha de inundação resultante, profundidade, velocidade, tempo de chegada da onda e as vazões de pico associadas, os resultados compilados dos 5 cenários indicaram valores muito próximos. O esforço computacional para a realização das simulações com a incorporação do transporte de sedimentos, neste estudo, foi da ordem de 25 vezes o tempo para a realização das simulações apenas com a consideração de fluidos aquosos ou hiperconcentrados.

A partir dos resultados observados nesta avaliação, conclui-se que nos primeiros quilômetros a jusante da estrutura avaliada, na região correspondente a Zona de Autossalvamento (ZAS), as simulações com fluidos aquosos ou hiperconcentrado são suficientes para a representação do fenômeno de ruptura. Essa colocação deve ser

vista com cuidado, entretanto, uma vez que o trecho avaliado foi relativamente curto em função do MDT disponibilizado. É esperado que um cenário com a incorporação do transporte de sedimentos promova uma maior dissipação da energia adquirida pela onda proveniente da ruptura ao longo da propagação do escoamento, uma vez que os rejeitos vão se depositar conforme a massa específica dos grãos e distribuição granulométrica. Dessa forma, a propagação do fluido composto apresentaria um amortecimento maior do que uma onda composta apenas por água, uma vez que o volume vai ficando retido ao longo da calha. Esse comportamento é esperado em especial a partir de determinada extensão a jusante, uma vez que nos primeiros quilômetros a energia da ruptura exerce grande influência na propagação.

Com isso, as diferenças na reologia do fluido na concentração simulada devem afetar de forma mais significativa as perdas de carga contínuas, que são melhor percebidas na medida em que se acumulam para jusante. Todavia, à medida que se avança para jusante, outros efeitos, tais como armazenamentos laterais e a existência de seções de controle, também ganham importância e podem mascarar essas diferenças em termos de área atingida. Ainda assim, o compromisso de representar adequadamente o fluido propagado permanece e repercute nos tempos de chegada. Alguns minutos podem ser a diferença entre vida e morte, principalmente Zona de Autossalvamento (ZAS), como ficou claro neste evento.

A partir destas colocações destacam-se algumas recomendações para trabalhos futuros, visando uma superação dos limites aqui observados e uma promoção de contribuições adicionais no que refere-se a influência do transporte de sedimentos em um *Dam Break*:

- ◁ Realização de modelagens da propagação da onda de ruptura pelo vale a jusante, com a incorporação do transporte de sedimentos, por um trecho mais extensos;
- ◁ Realização de modelagens hidráulicas em outros *softwares* de referência aplicáveis, de forma a verificar a sensibilidade dos resultados aos modelos utilizados, como por exemplo no RiverFlow2D;

- ◁ Realização de ensaios em laboratório de forma a validar a aplicabilidade de equações da literatura, referentes a sedimentos naturais, para o caso de uma ruptura de barragem de rejeitos.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rochas e Solos. NBR 6502, 1995.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. *Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone*. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

ALMEIDA, B. C. M. (2019). *Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem de Fundão através do modelo numérico HISTAV*. TCC (Graduação). – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019, 72 f.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Guia de Orientação e Formulário do Plano de Ação de Emergência (PAE)*. Volume IV. 129 p. Brasília, 2016.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Painel de Informações do SNISB. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/graficos>>. Acesso em 02 de abril de 2022.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Relatório de Segurança de Barragens 2020. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020>>. Acesso em 02 de abril de 2022.

ANDRADE, S. B.; VALE, V. L.; SALIBA, A. P. M.; NASCIMENTO, N. O. Avaliação da Concentração de Sólidos Totais na Bacia do Rio Paraopeba após Ruptura da Barragem I – Brumadinho. *Revista Augustus*, Rio de Janeiro, v. 24, n. 49, p. 100-112, dez. 2019.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Resolução Nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. BRASIL: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>>.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.

BANDINI, B.; VITÓRIA, F. C.; SILVA, E. R.; ALMEIDA, J. R. Desastre Ambiental da Barragem de Fundão, Mariana, MG - Análise de Impactos Socioambientais. *Revista Internacional de Ciências*, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 2-15, 30 dez. 2019. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.12957/ric.2019.40296>.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 3ª ed. Belo Horizonte: *Editora UFMG*, 2010. 473.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. An introduction to rheology. 3a ed. Amsterdam: *Elsevier*, 1993.

BBC NEWS BRASIL. Brumadinho é maior acidente de trabalho já registrado no Brasil. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47012091>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

BOGER, D.V. Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry. P.57-239. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2013.

BRAGA, A.S. *Análise comparativa entre metodologias de estimativa de descarga sólida e medições de campo na Bacia do Rio Doce*. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG. 112 p., 2022.

BRANDÃO, M. *Modelagem Hidrodinâmica Uni e Bidimensional Aplicada ao Rompimento da Barragem do Fundão em Mariana (MG)*. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 207 p., 2019.

BRASIL. 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 n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei n. 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, 2010.

BRASIL. Lei no 14.066 de 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).

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos Construtivos De Barragens De Rejeitos De Mineração – Uma Revisão. *Holos*, [S.L.], v. 8, p. 77, 9 maio 2017. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.5367>.

CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia prática. 2ª ed., rev., atual. e ampliada. Rio de Janeiro: *Interciência*, 599 p., 2008.

CHANSON, H. The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. 2nd Edition, *Butterworth-Heinemann*, London, 585 p., 2004.

CHARLTON, R. Fundamentals of fluvial geomorphology. London: *Routledge*, 234 p., 2008.

CORDEIRO, J. *Evolução hidrogeomorfológica de sistemas fluviais afetados por ruptura de barragem de rejeito*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 294 p., 2022.

DIAS, N. A. *Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional*. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória. 2017.

DOERING, C.; GIBBON, D. Applied Analysis of the Navier-Stokes Equations. *Cambridge University Press*, 217 p., 2004.

FELIPPE, M; MENDES, L. Para onde foi a lama da barragem de Fundão (Mariana, Minas Gerais)? A distribuição dos rejeitos ao longo dos vales fluviais afetados pelo desastre da Samarco/Vale/BHP. *Revista Espinhaço*, v. 11, n. 1, 2022.

FERREIRA, D. S. *Análise do comportamento de aterro experimental executado sobre um depósito de rejeitos finos*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Núcleo de Geotecnia. 145pg, 2016.

FISRWG. Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices. *The Federal Interagency Stream Restoration Working Group*, 2001.

FROEHLICH, D. C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 12. Maio, 2008. pp 1708-1720.

GRAF, W. Hydraulics of Sediment Transport. Highlands Ranch: *Water Resources Publications LLC*, 2010.

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

Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2020. 80p.

JULIEN, P. Y. Erosion and sedimentation. 2ª ed. *Cambridge University Press*, 371 p., 2010.

LANE, E. W. *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*. Hydraulic laboratory report, no. 372, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Laboratories, Commissioner's Office. Denver, Colorado, 1954.

LAURIANO, A. W. *Estudo de ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LAURIANO, A. W.; PALMIER, L. R.; MONTE-MOR, R. C. A.; BRASIL, L. S. S.; NASCIMENTO, N. O.; SOUZA, N.; CANELLAS, A. V. B. *Mapeamento de áreas potencialmente inundáveis face à ruptura hipotética de barragens – estudo de caso: barragem de Funil e barragem de Manso*. XXIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena De Indias, Colombia, 2008.

LEAL, J. G. A. B.; FERREIRA, R. M. L.; CARDOSO, A. H. *Modelação de Ondas de Cheia Provocadas pela Ruptura de Barragens: Influência do Fundo Móvel*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Congresso Água. 2004.

LIMA, R. P., ELMIRO, M. A. T., NERO, M. A., TEMBA, P. D. C., FONSECA, B. M., CASTIGLIONE, L. H. G. Avaliação de modelos digitais de terrenos em estudos de simulação de rompimento de barragens. *Boletim de Ciências Geodésicas*, n. 27. 2021.

MACHADO, N. C. *Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da Barragem do Fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação*. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG. 189 p., 2017.

MACHADO, N. C.; DIAS, N. A.; SALIBA, A. P.; SANTOS, B. B. *A Importância da Reologia do Minério de Ferro – Material Típico de Alçamento de Barragens por Montante*. Comitê Brasileiro de Barragens: II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos - SGBR, Belo Horizonte, maio 2017.

MATOS, A. C. S. *Modelagem Hidrodinâmica de perdas de vidas humanas associadas à ruptura da Barragem de Fundão, para o subdistrito de Bento Rodrigues, Mariana (MG)*. 2018. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

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

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. *Physical properties and mechanics hyperconcentrated sediment flows*. In: specialty conference - delineation of landslide, flash flood and debris flow hazards in utah, Logan, 1984. Proceedings Utah: Utah State University, p. 260-279. 1985.

PAIVA, R; COLLISCHONN, W; TUCCI, C. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *Journal of Hydrology*, v. 406, n. 3–4, p. 170–181, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>>.

PALMIER, L. R.; BRASIL, L. S. S.; MONTE-MOR, R. C.; NASCIMENTO, N.; ROCHA, E. G. SILVA, N. S.; CANELLAS, A. V. B. *Modelagem simplificada de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem – Estudo de caso: barragem do aproveitamento múltiplo Manso, Mato Grosso, Brasil*. I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-oeste, Cuiabá, MT, 2007.

PALU, M. C., JULIEN, P. Y. Modeling the Sediment Load of the Doce River after the Fundão Tailing Dam Collapse, Brazil. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019.

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

RICO, M. et al. Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, v. 152, n. 2, p. 846–852, 2008.

RICO, M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, A. Floods from tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*, v. 154, n. 1–3, p. 79–87, 2008.

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

ROCHA, F; BRASIL, L.; LOPES C.; COELHO, L. *Critérios técnicos para realização de estudos de ruptura de barragens de rejeitos*. II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos - SGBR, n. T.2 – A.7, p. 1–19, 2017.

SALIBA, A. P. M. *Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 179 p., 2009.

SALLES, T.A.C., *Modelagem do transporte de sedimentos em suspensão no rio Paraopeba, após ruptura da barragem B1 da mina Córrego do Feirão*. Trabalho de Conclusão do curso de Engenharia Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

SAMARCO. *Entenda o Rompimento de Fundão*. Disponível em: <https://www.samarco.com/reparacao/>. Acesso em: 04 de agosto de 2021.

SILVA, A. *Análise de incerteza dos parâmetros de brecha aplicada à modelagem probabilística do hidrograma de ruptura de barragens de terra*. 384 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2021.

SILVA, C; JR. SILVA, T; JR. PINTO, I. Caracterização Reológica de Fluidos Não Newtonianos e sua Aplicabilidade na Indústria. *Ciências exatas e tecnológicas*, v. 5, n. 2, p. 285–300, 2019.

SILVA, D; FAIS, L; FREIRIA, R. Segurança de Barragens: Panorama Histórico da Legislação Brasileira. *Revista de Direito Política e Filosofia*, p. 20, 2020.

SILVA, F; LIMA, A. *Análise comparativa de levantamentos topobatimétricos no rio doce para avaliação das alterações morfológicas ocorridas na calha fluvial*. p. 1–8, 2016.

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. Determination of fluvial sediment discharge. *Inter-Agency Committee on Water Resources*. Report n° 14. Washington, D. C. 151 p., 1963.

SUMMER, W.; WALLING, D. E. Modelling erosion, sediment transport and sediment yield. *International Hydrological Programme*. IHP-VI. Technical Documents in Hydrology, n. 60, UNESCO, Paris. 264 p., 2002.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. Barragens de Rejeitos de Mineração: Características do Método de Alçamento para Montante que Fundamentaram a Suspensão de sua utilização em Minas Gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, v. 18, n. 34, p. 49-65, 2018.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS 6.0, *Hydraulic Reference Manual*. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2021b.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS 6.0, 2D_Sediment_Technical_Reference. Davis: *Hydrologic Engineering Center* (HEC), 2021a.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS 6.0, 2D_Sediment_Users_Manual_(Beta) Davis: *Hydrologic Engineering Center* (HEC), 2020a.

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

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

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – *Hydraulic Reference Manual*. Version 5.0. Davis, Califórnia, 2016.

USGS .-. United States Geological Survey Distinguishing between Debris Flows and Floods from Field Evidence in Small Watersheds. *Geological Survey Fact Sheet U* 2004-3142, 2005

VANONI, V. A. *Sedimentation Engineering*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 54, USA, 2006.

VIANINI NETO, L. *Estudo de Ruptura da Barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da Brecha do Acidente de 1954 e Ruptura Hipotética nas Condições Atuais*. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

WAHL, T L., HANSON, G.J., COURIVAUD, J., MORRIS, M.W., KAHAWITA, R., McCLENATHAN, J.T., GEE, D.M. *Development of Next-Generation Embankment Dam Breach Models*, United States Society on Dams, 28th Annual USSD Conference, Portland, OR, Abril - Maio, 2008, pp. 767-779.

WAHL, T. *Dam Breach Modeling – an Overview of Analysis Methods*. 2nd Joint Federal Intragency Conference Las Vegas, NV, p. 1–12, 2010.

WENTWORTH, C. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, v. 30, n. 5, p. 377–392, 1922.

WISE URANIUM PROJECT. *World Information Service on Energy*. Disponível em: <<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acesso em: 22 de julho de 2021.

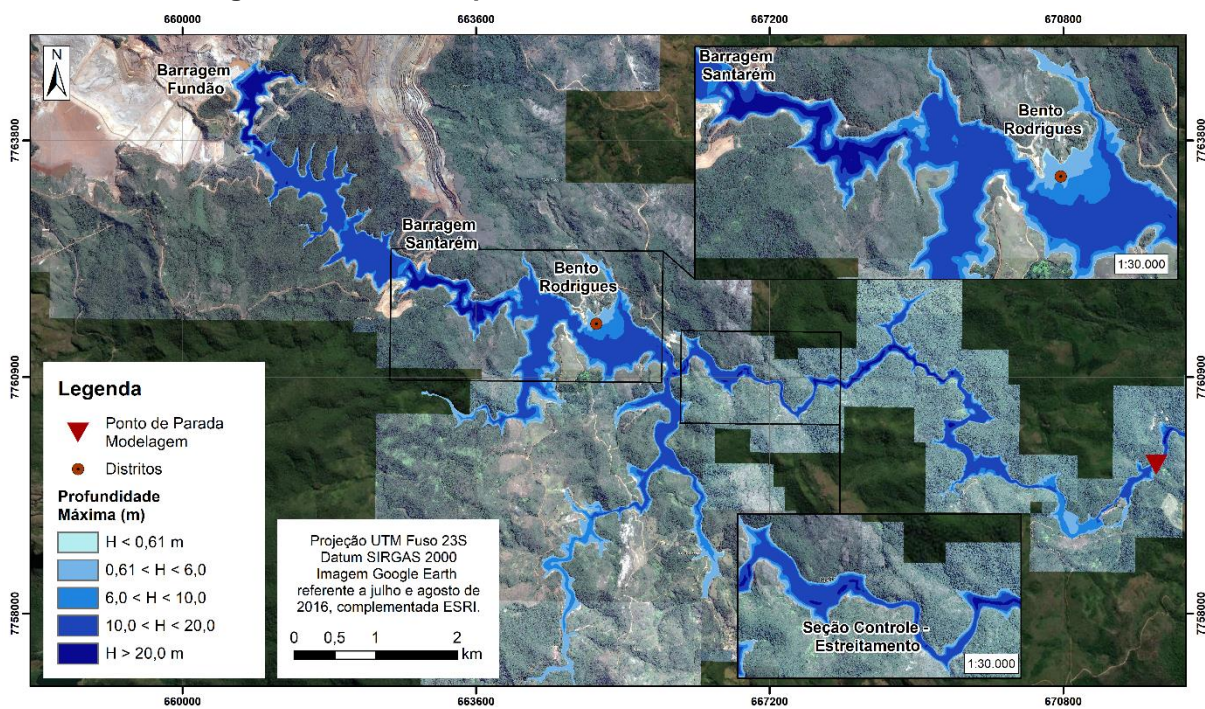
YAN, K.; DI BALDASSARRE, G.; SOLOMATINE, D. P.; SCHUMANN, G. J. P. A review of ow-cost space-borne data for flood modelling; topography, flood extent and water level. *Hydrological Processes*, 2015.

ZHANG, L., PENG, M., CHANG, D., XU, Y. *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*. Wiley, 476 p., 2016.

ZHANG, L; XU, Y.; JIA, J. S. *Analysis of earth dam failures: A database approach*. *Georisk*, v. 3, n. 3, p. 184–189, 2009.

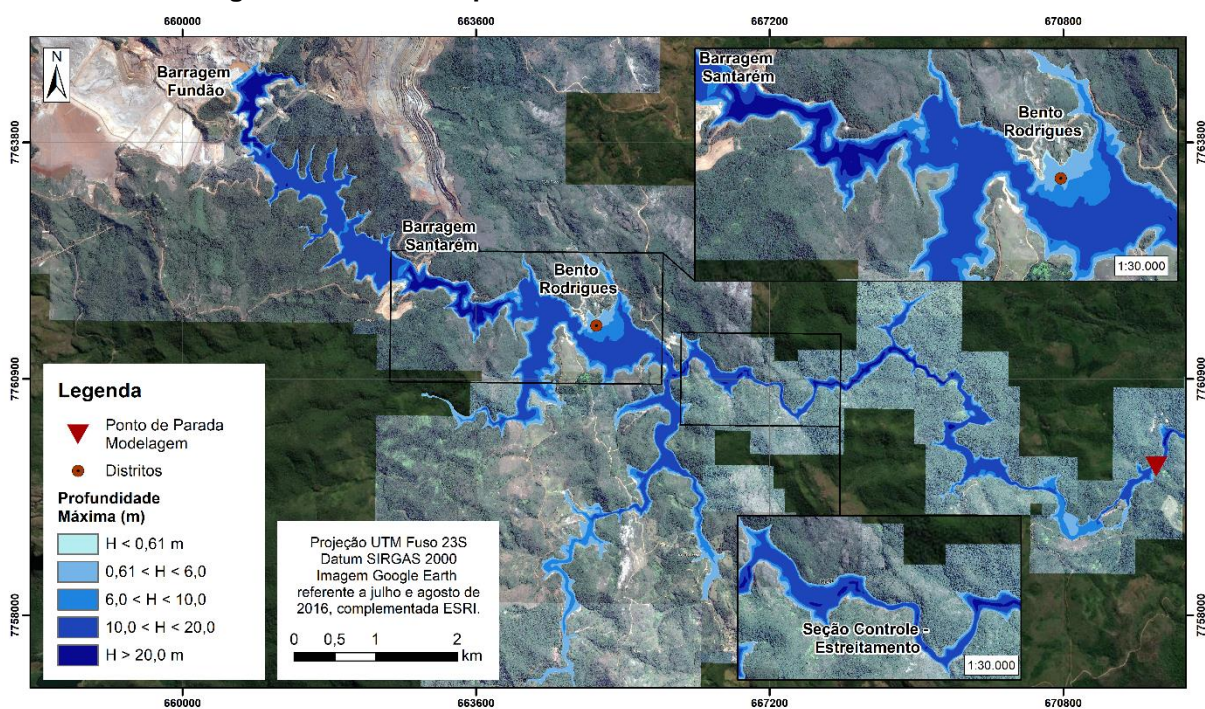
APÊNDICE A – Mapas Temáticos

Figura 77 É Máximas profundidades de escoamento É Cenário 4



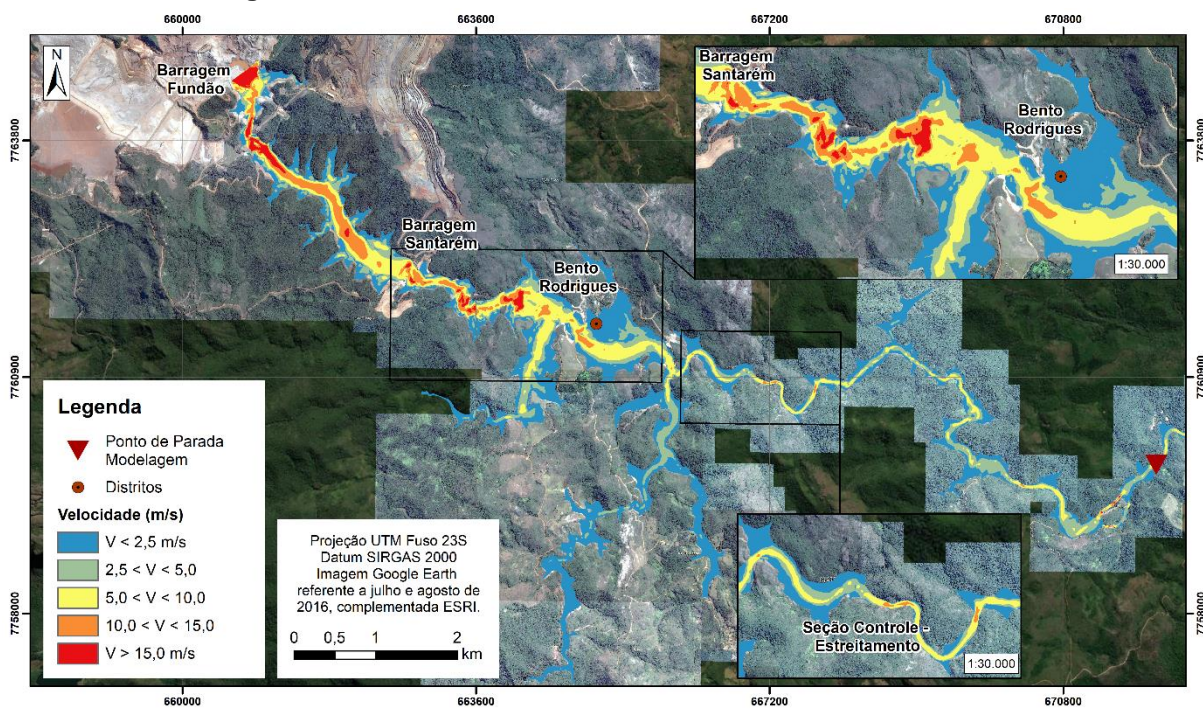
Fonte: Autora (2022)

Figura 78 É Máximas profundidades de escoamento É Cenário 5



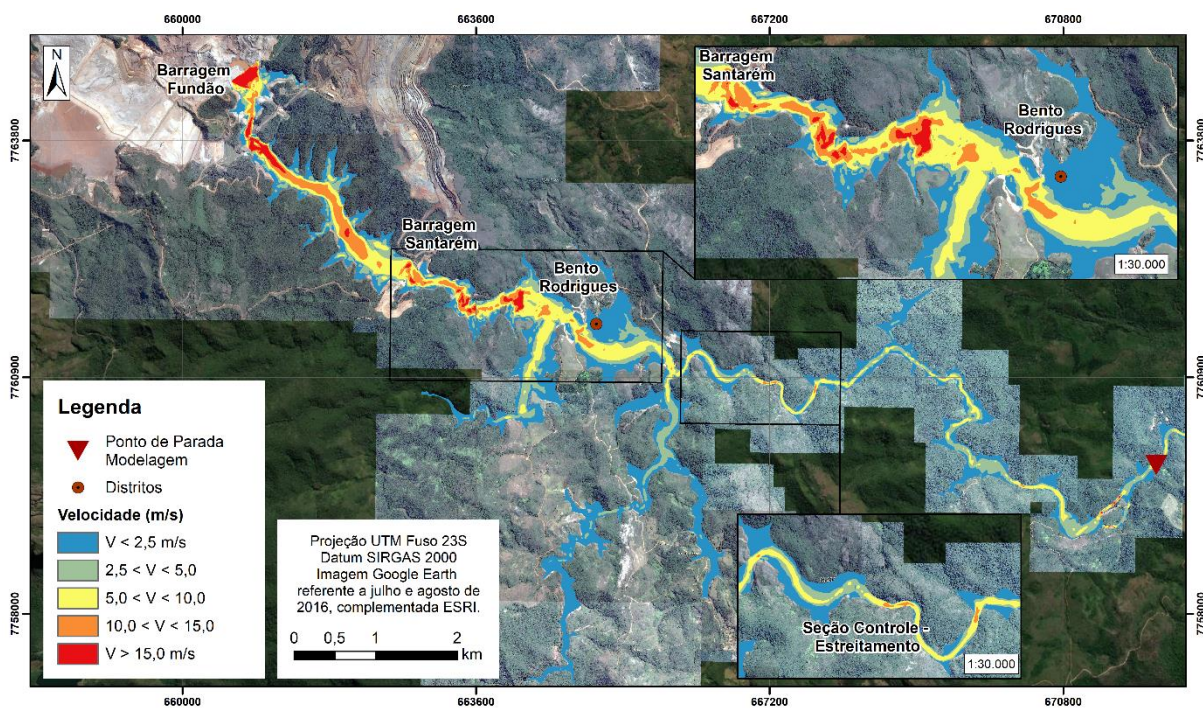
Fonte: Autora (2022)

Figura 79 - Máximas velocidades de escoamento - Cenário 4



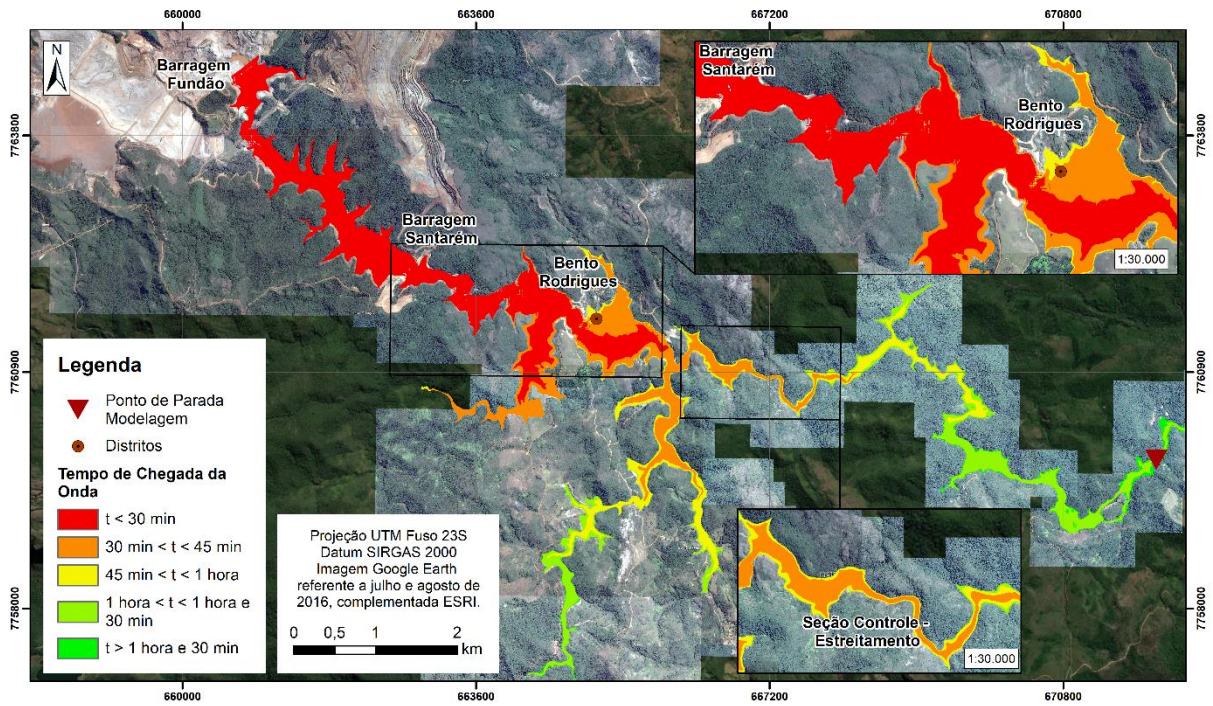
Fonte: Autora (2022)

Figura 80 - Máximas velocidades de escoamento - Cenário 5



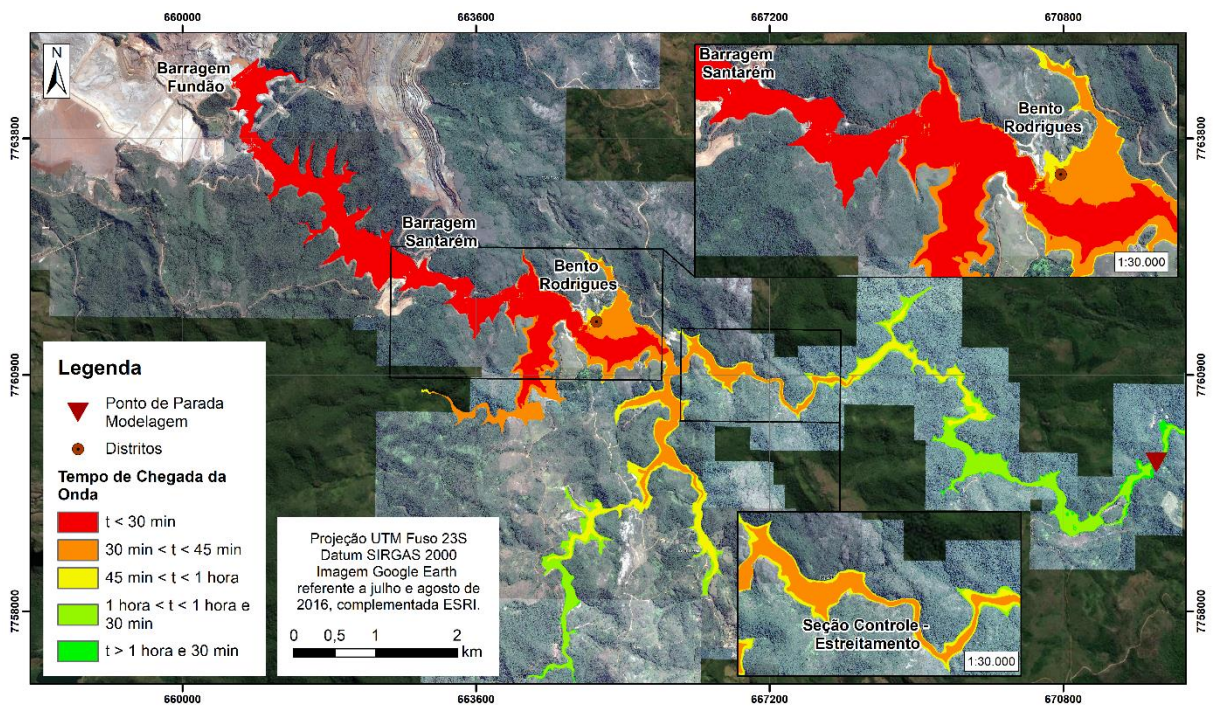
Fonte: Autora (2022)

Figura 81 É Tempo de chegada da onda É Cenário 4



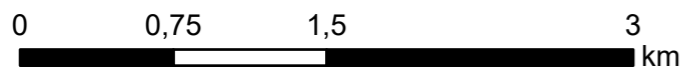
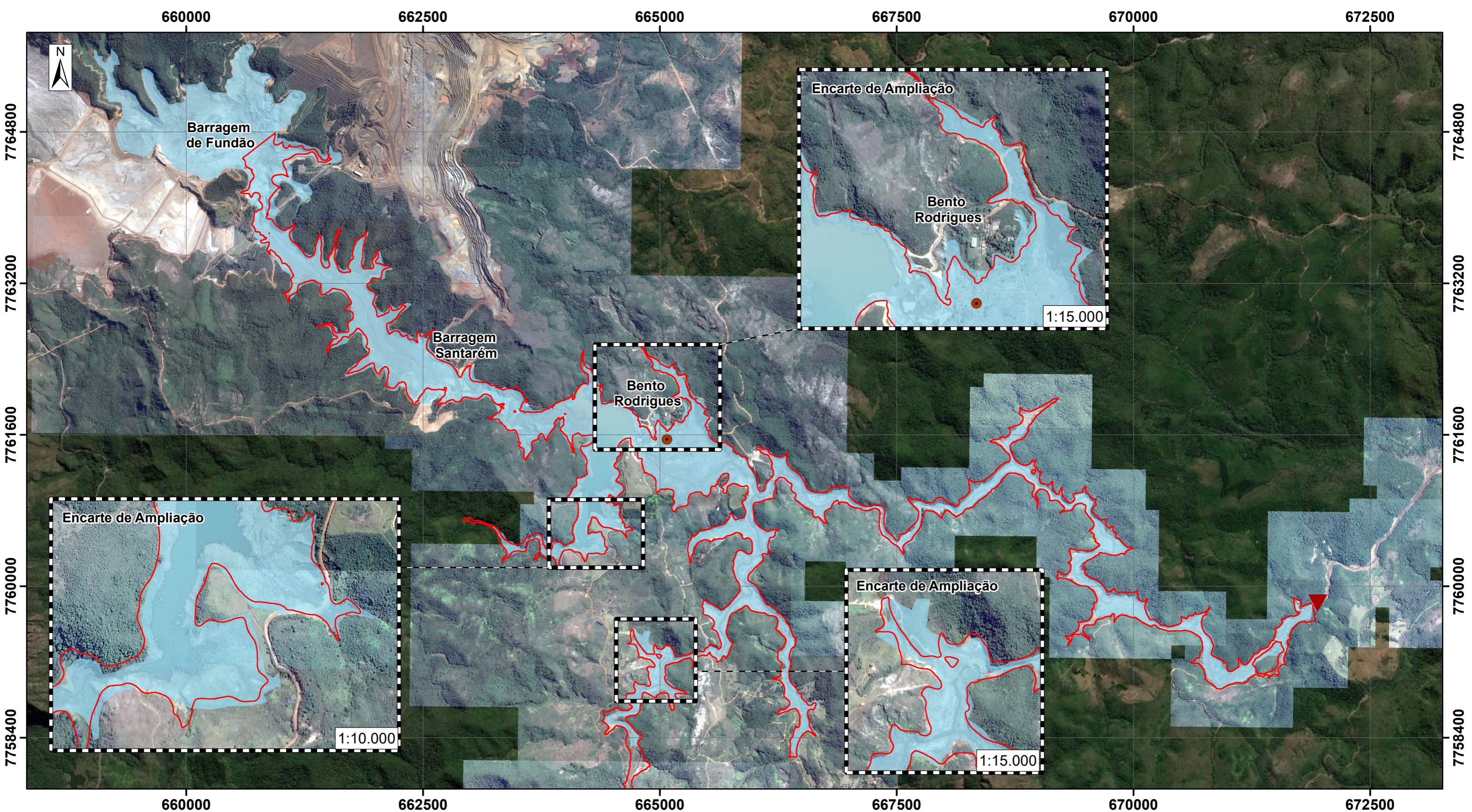
Fonte: Autora (2022)

Figura 82 É Tempo de chegada da onda É Cenário 5



Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE B Ẽ Mapas de Inundações



Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

- Ponto de Parada Modelagem
- Distritos
- Mancha de Inundação - Cenário 1
- Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

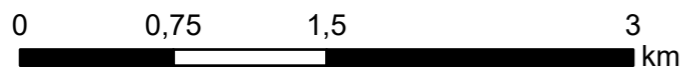
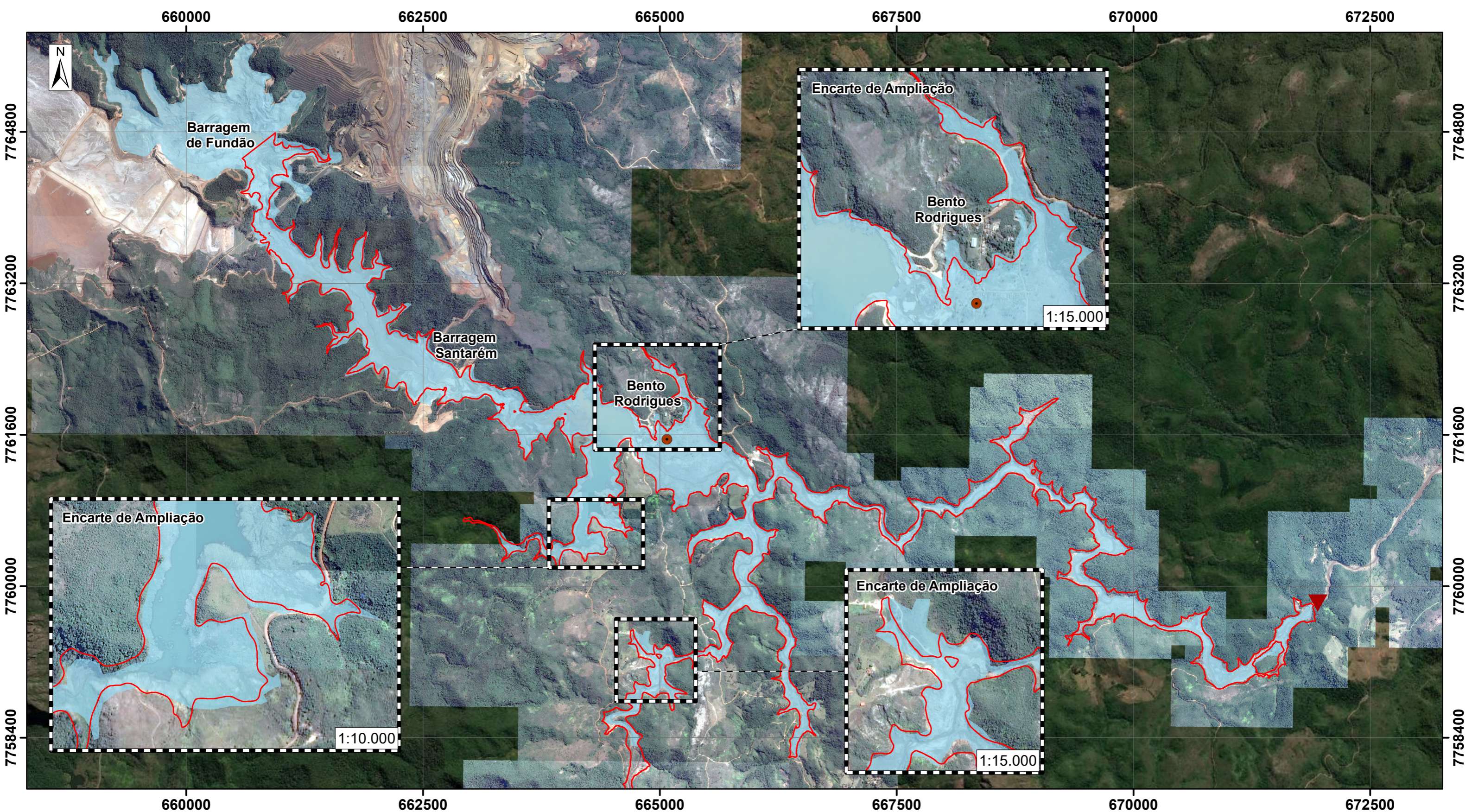
**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 1 - Fluido Aquoso

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3



Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

- Ponto de Parada Modelagem
- Mancha de Inundação - Cenário 2
- Distritos
- Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

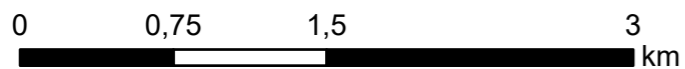
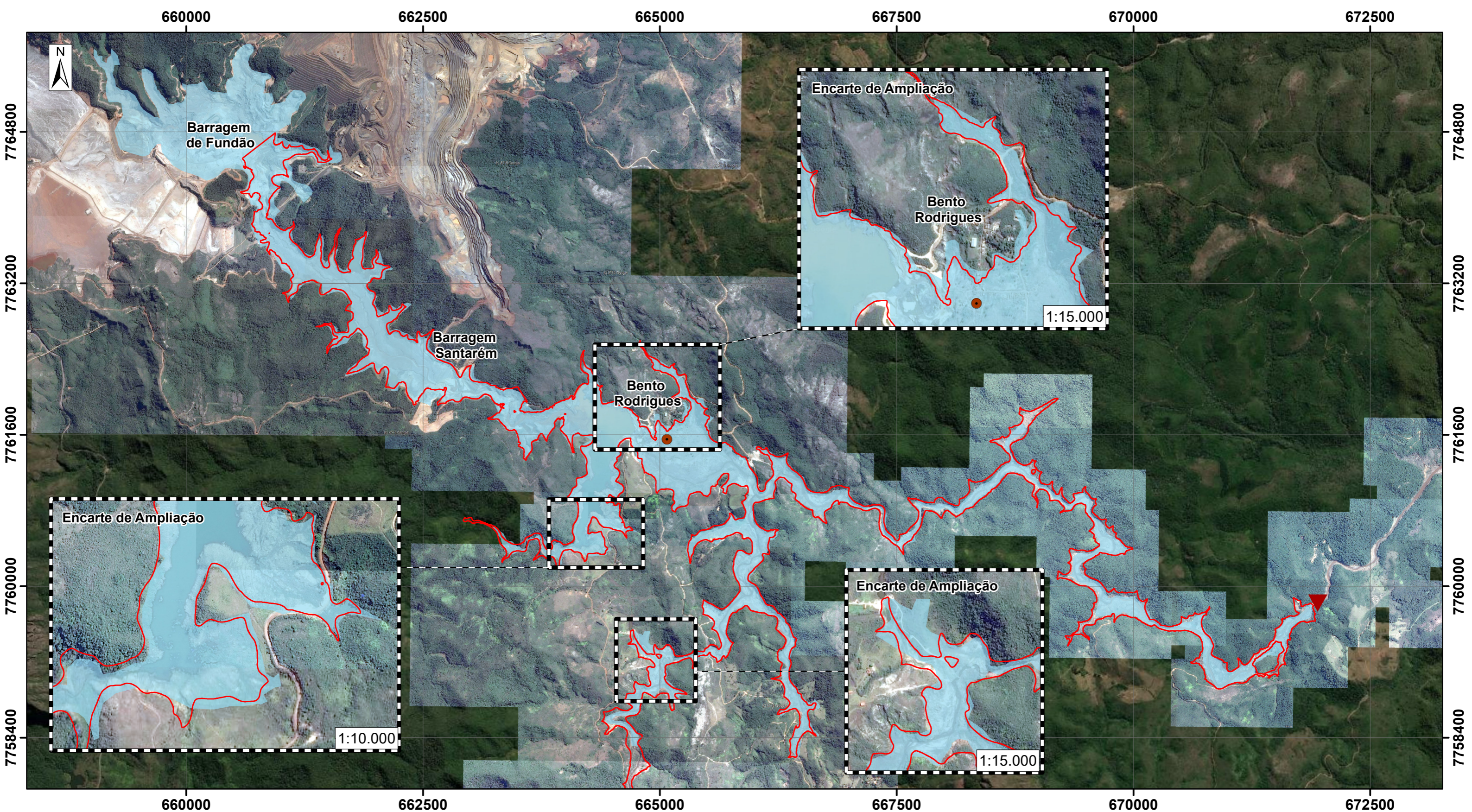
**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 2 - Fluido
Hiperconcentrado

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3



Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

- Ponto de Parada Modelagem
- Mancha de Inundação - Cenário 3
- Distritos
- Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

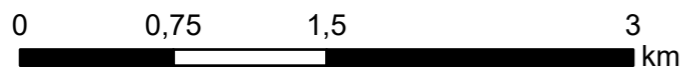
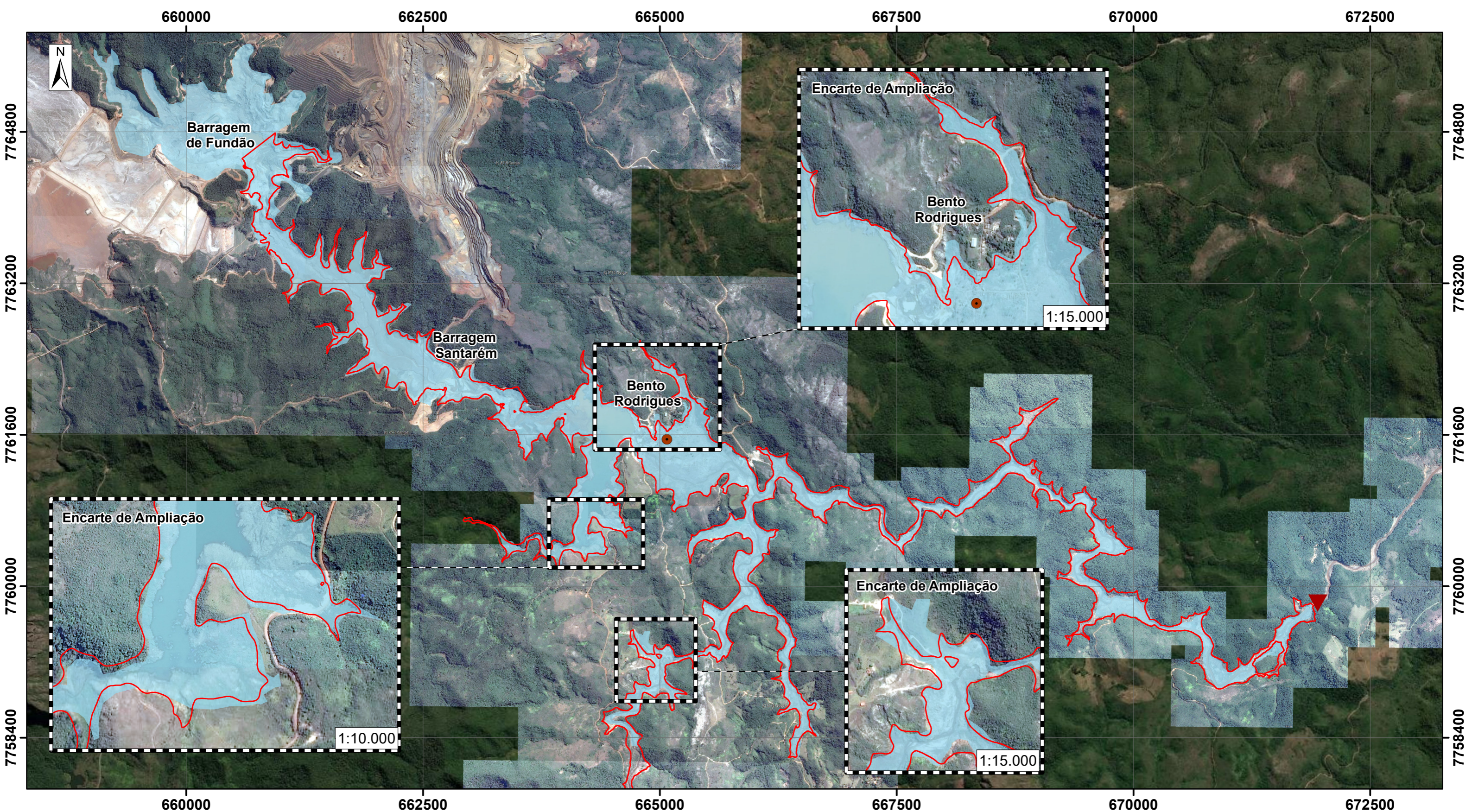
**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 3 - Inserção dos
Parâmetros de Transporte de Sedimentos

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3







Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

-  Ponto de Parada Modelagem
-  Distritos

-  Mancha de Inundação - Cenário 4
-  Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

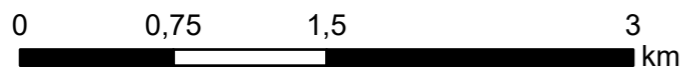
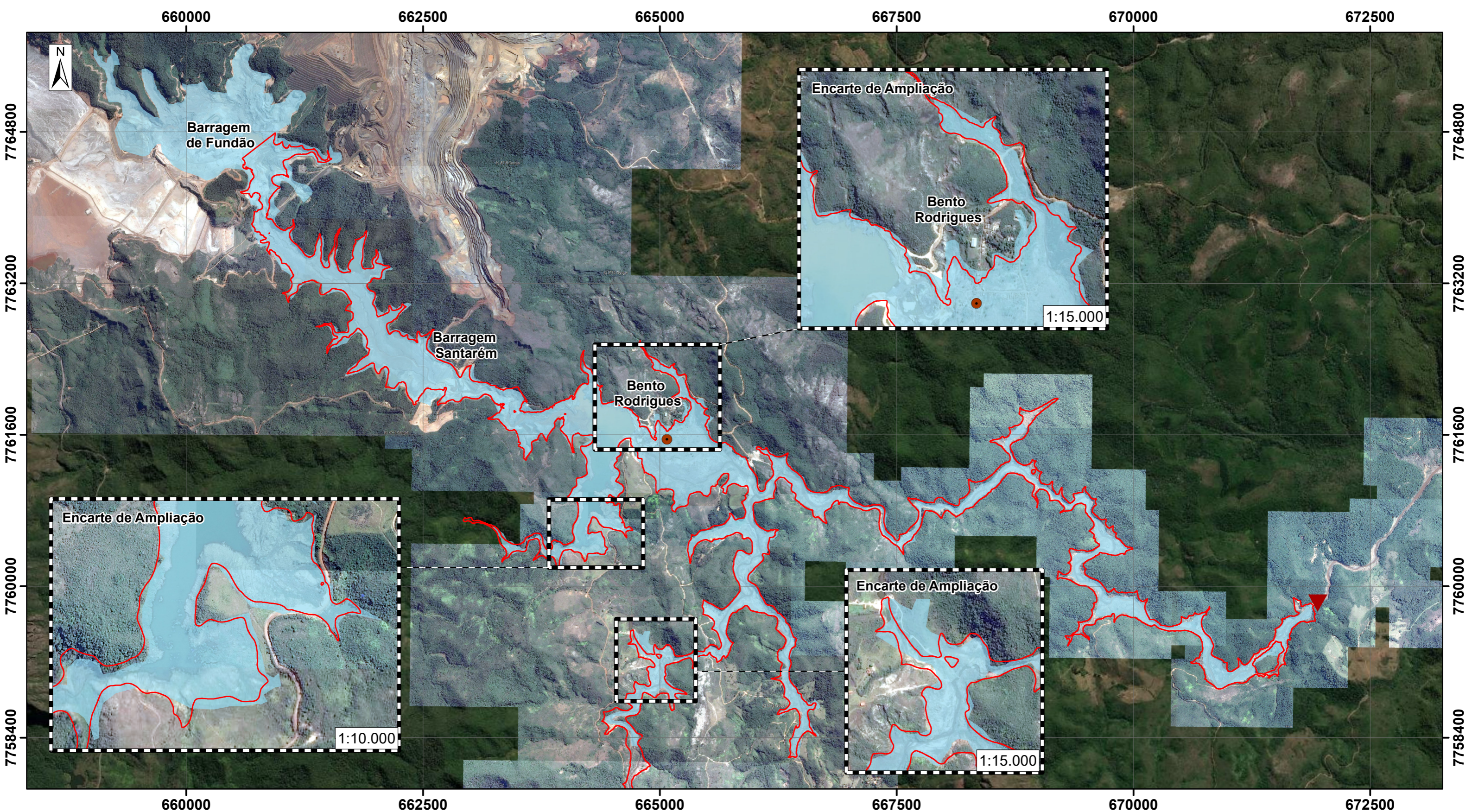
**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 4 - Inserção dos
Parâmetros de Transporte de Sedimentos

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3







Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

-  Ponto de Parada Modelagem
-  Distritos

-  Mancha de Inundação - Cenário 5
-  Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 5 - Inserção dos
Parâmetros de Transporte de Sedimentos

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

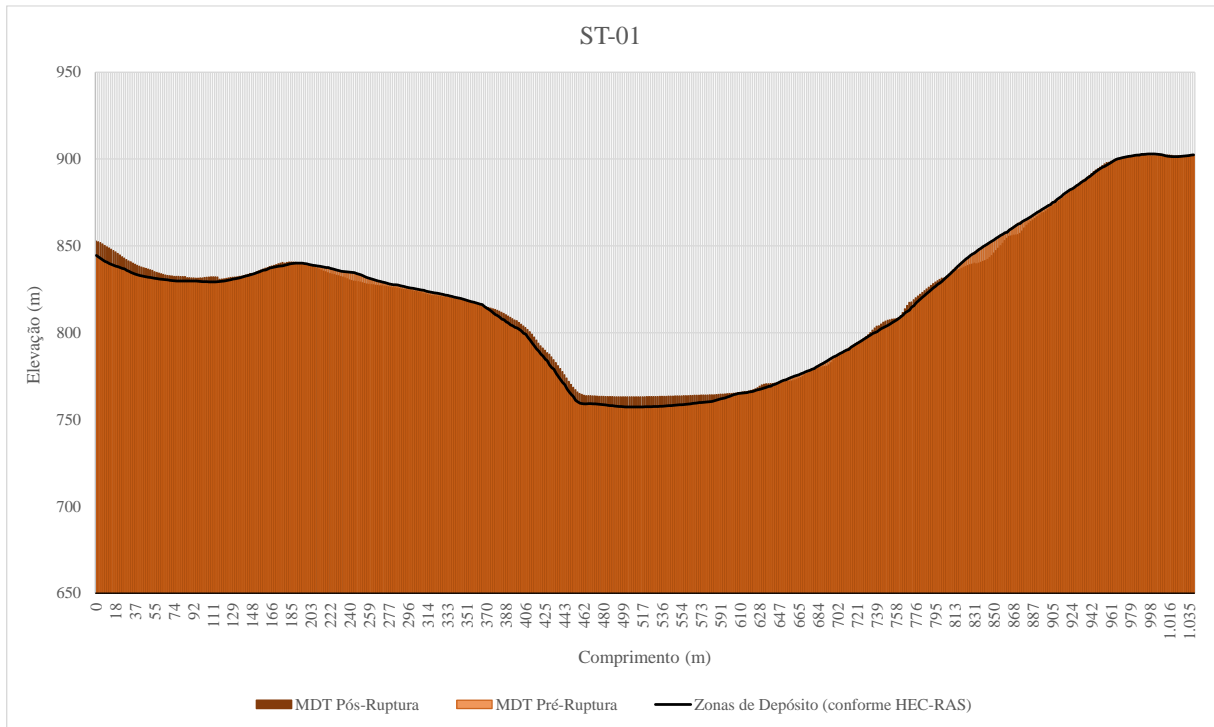
Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3

APÊNDICE C – Zonas de Depósito

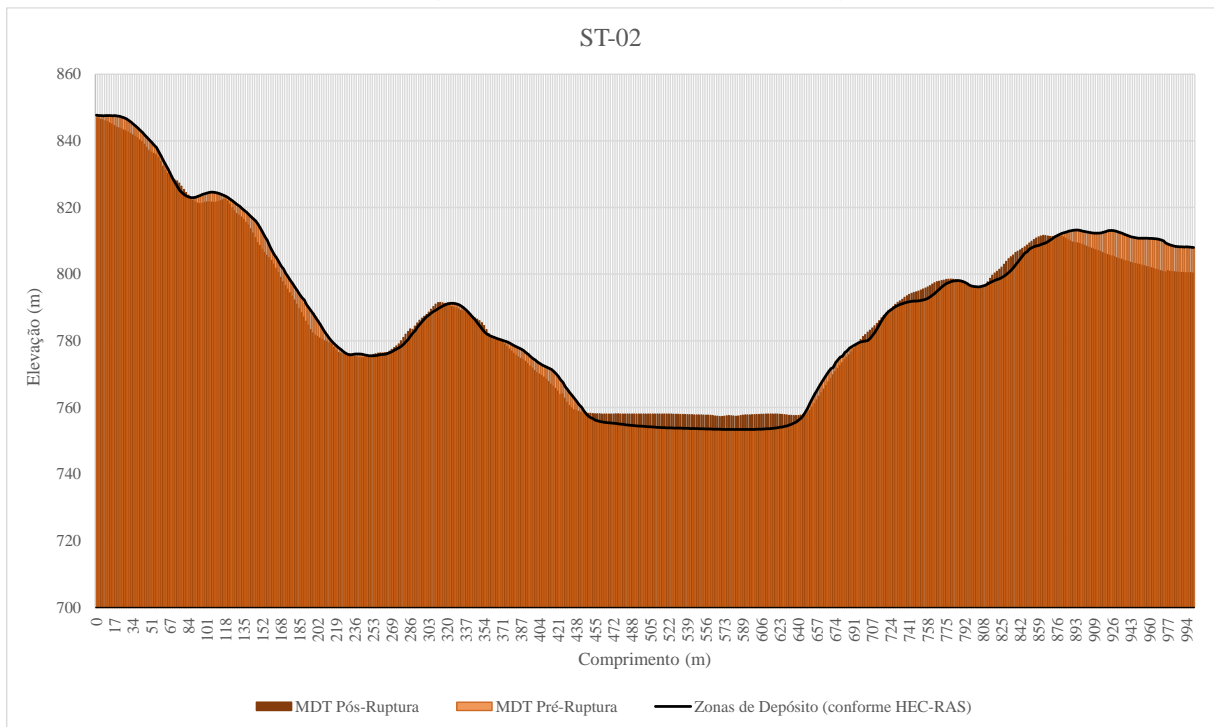
Cenário 3 – Fluido aquoso com a inserção do transporte de sedimentos

Figura 83 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 01 (ST-01)



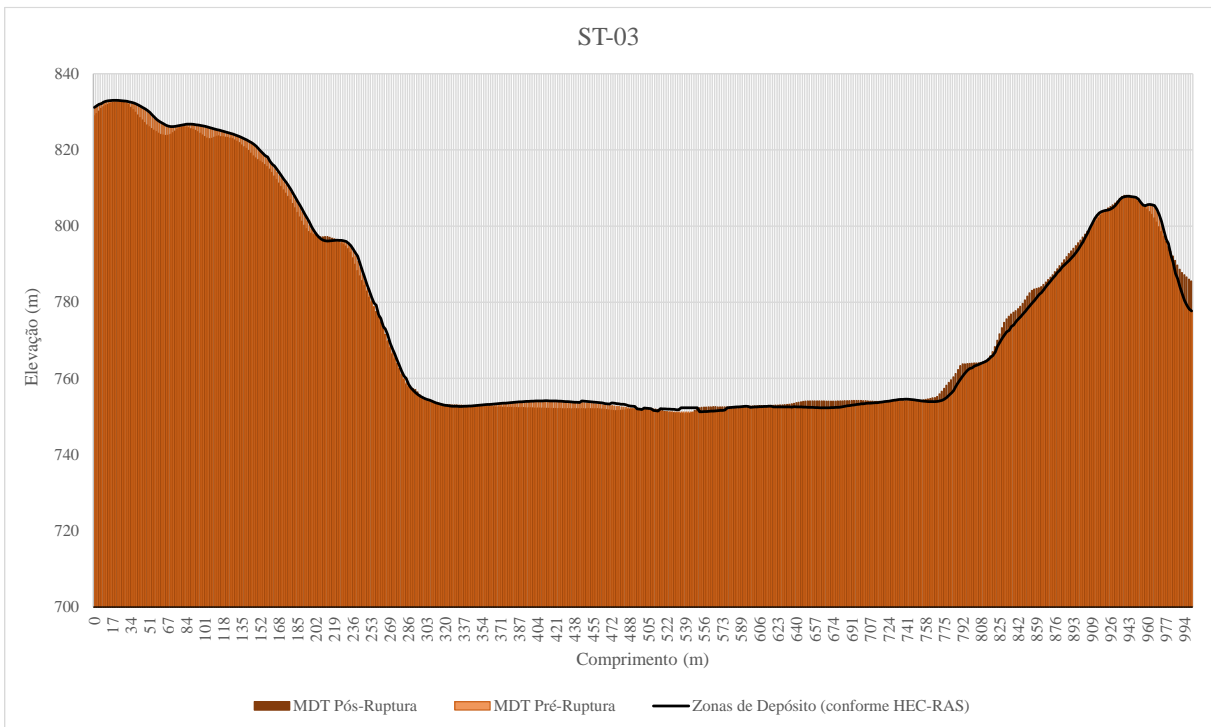
Fonte: Autora (2022)

Figura 84 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 02 (ST-02)



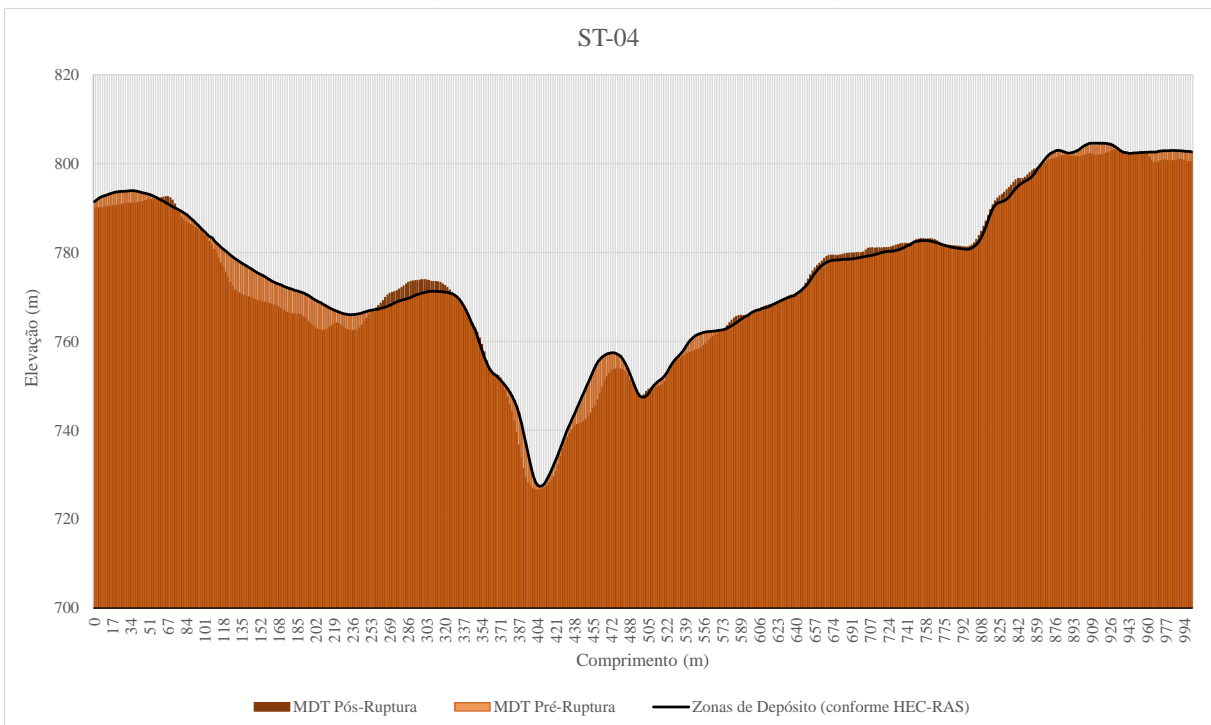
Fonte: Autora (2022)

Figura 85 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 03 (ST-03)



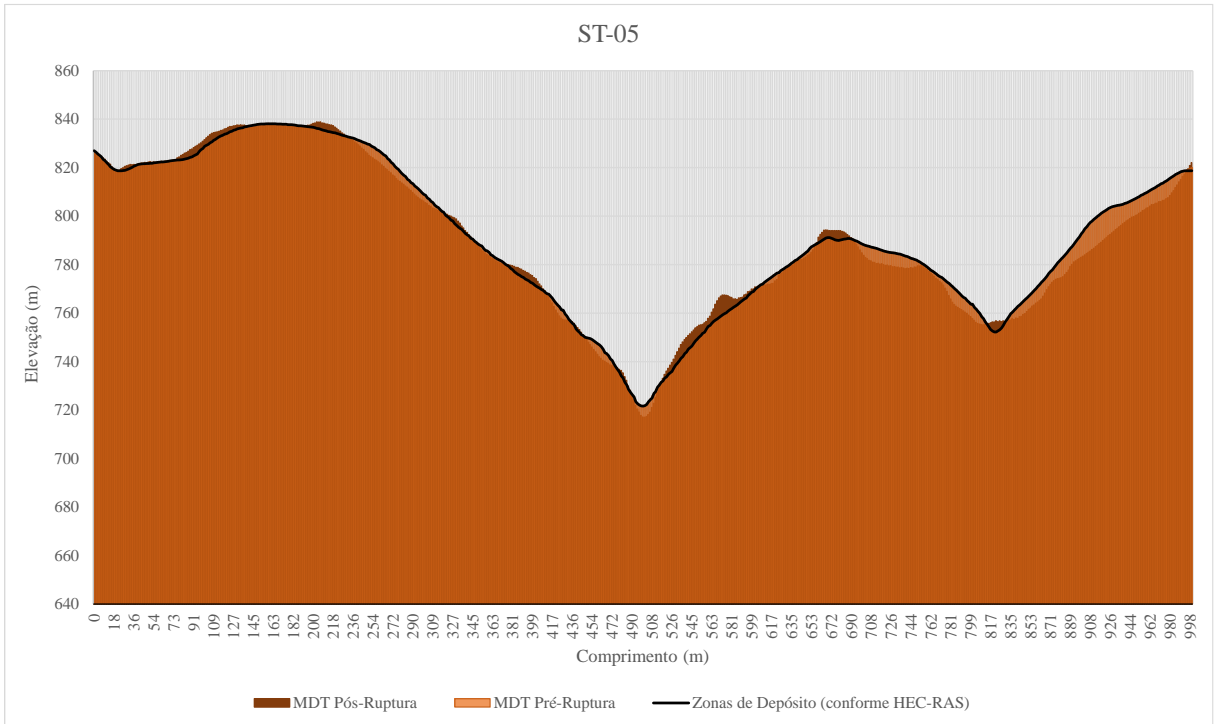
Fonte: Autora (2022)

Figura 86 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 04 (ST-04)



Fonte: Autora (2022)

Figura 87 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 05 (ST-05)



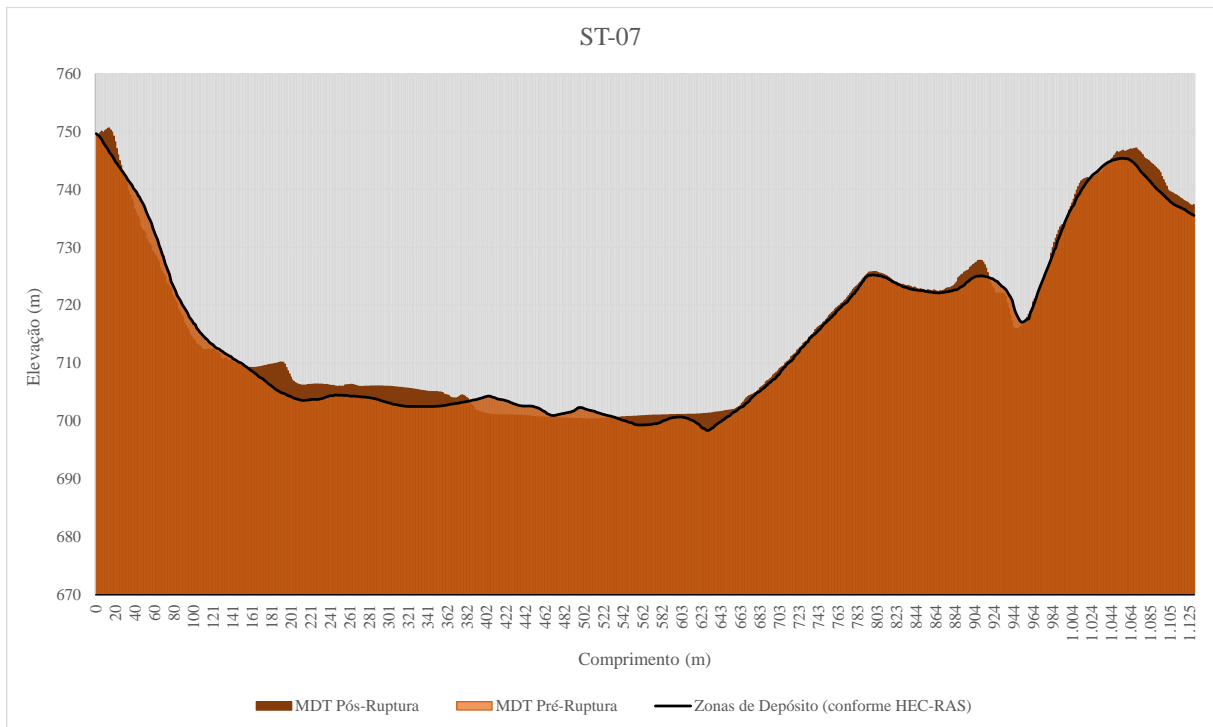
Fonte: Autora (2022)

Figura 88 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 06 (ST-06)



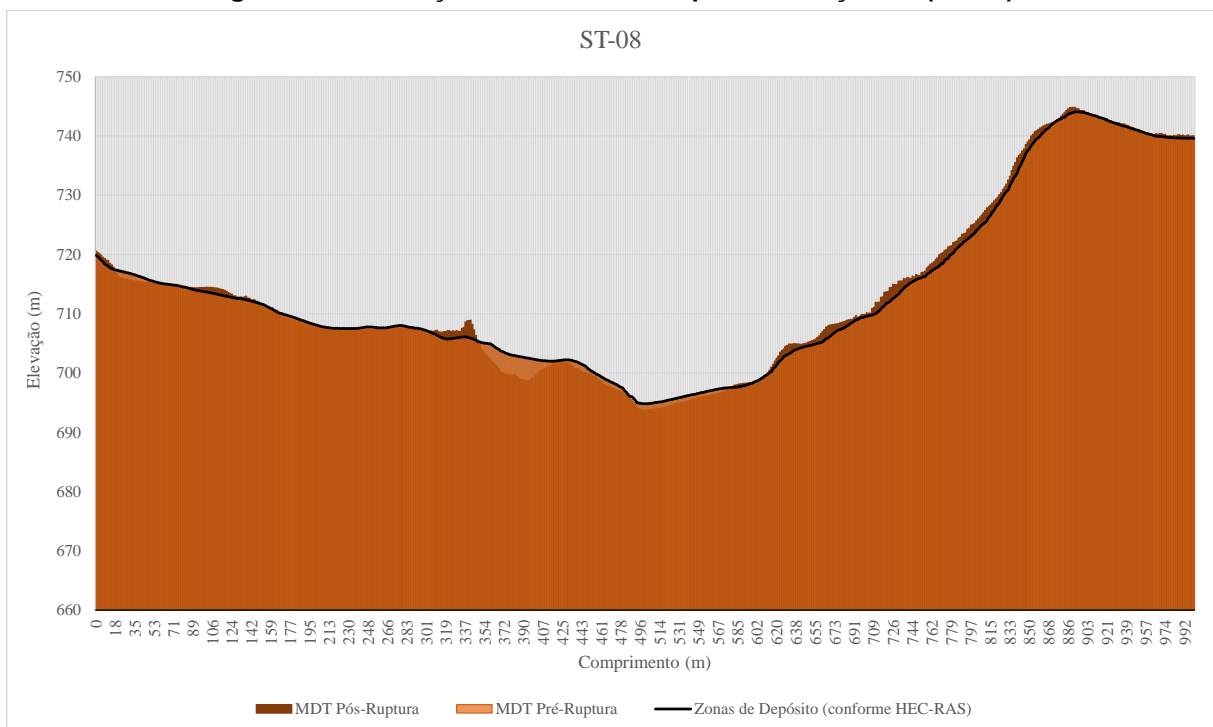
Fonte: Autora (2022)

Figura 89 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 07 (ST-07)



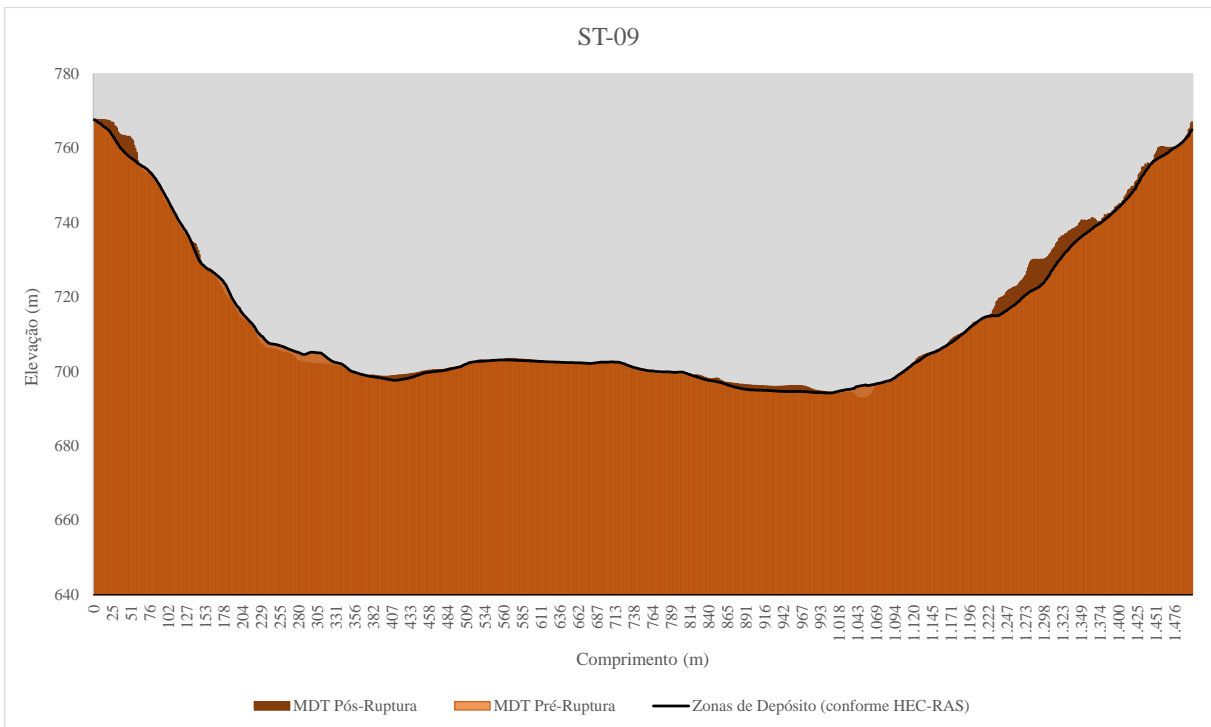
Fonte: Autora (2022)

Figura 90 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 08 (ST-08)



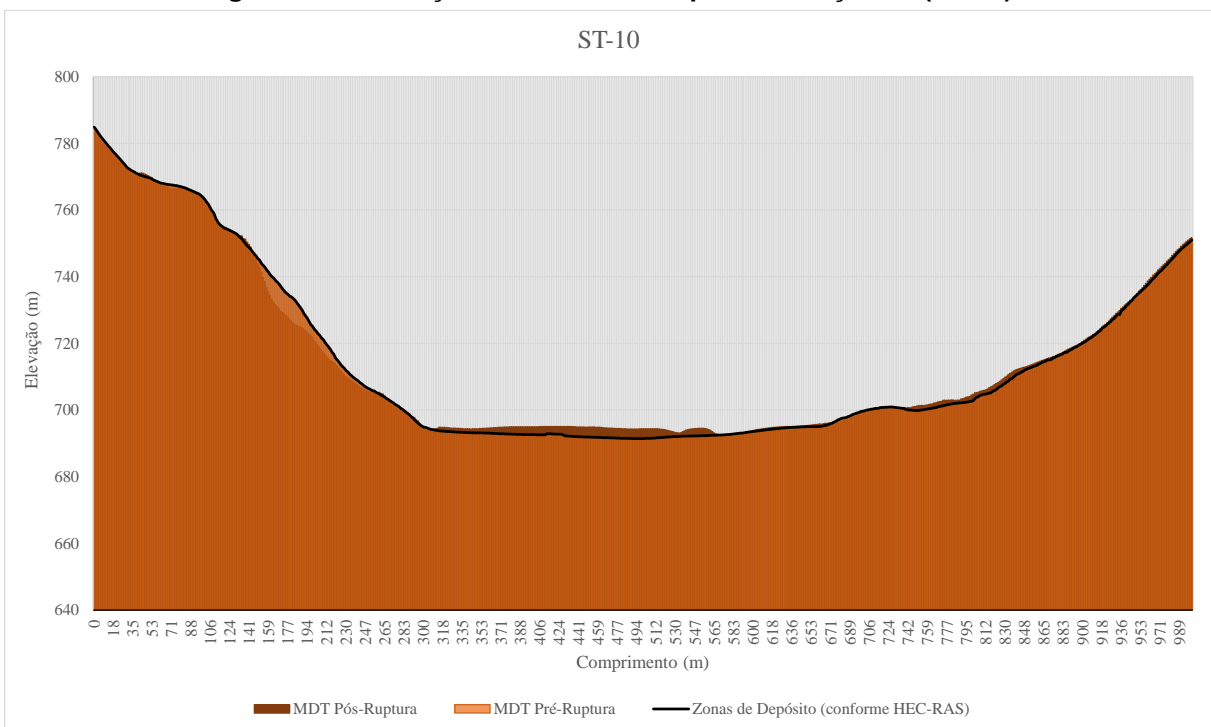
Fonte: Autora (2022)

Figura 91 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 09 (ST-09)



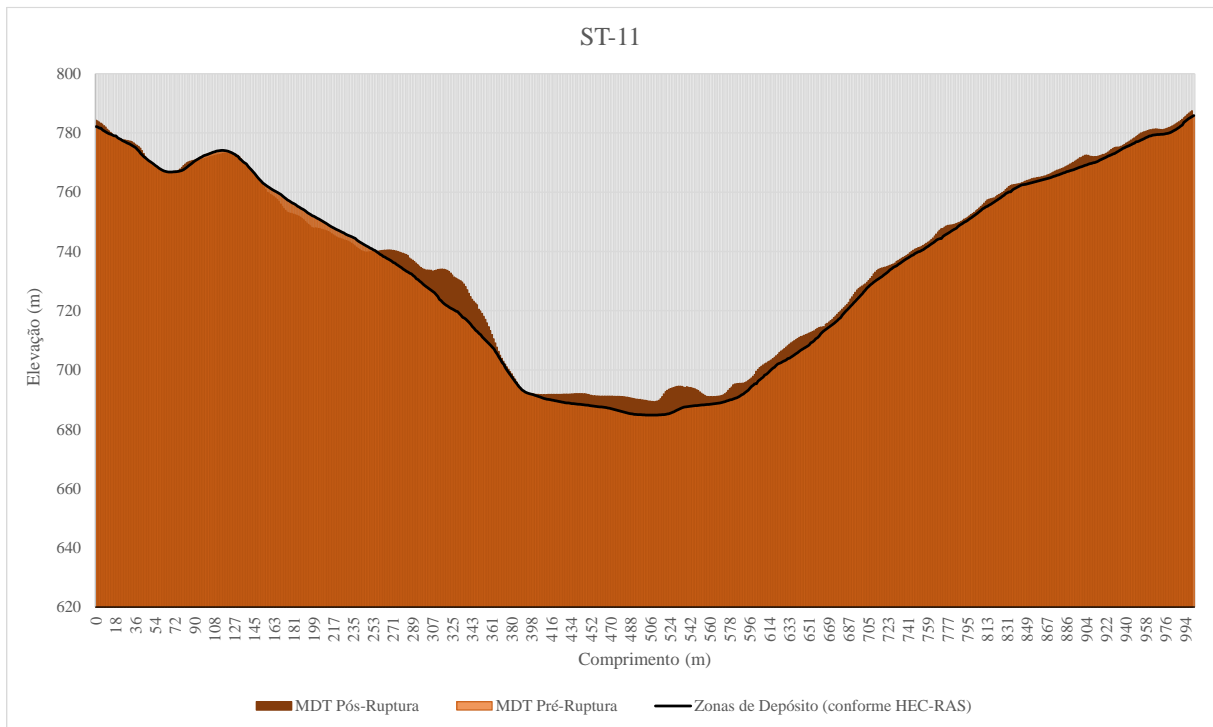
Fonte: Autora (2022)

Figura 92 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 10 (ST-10)



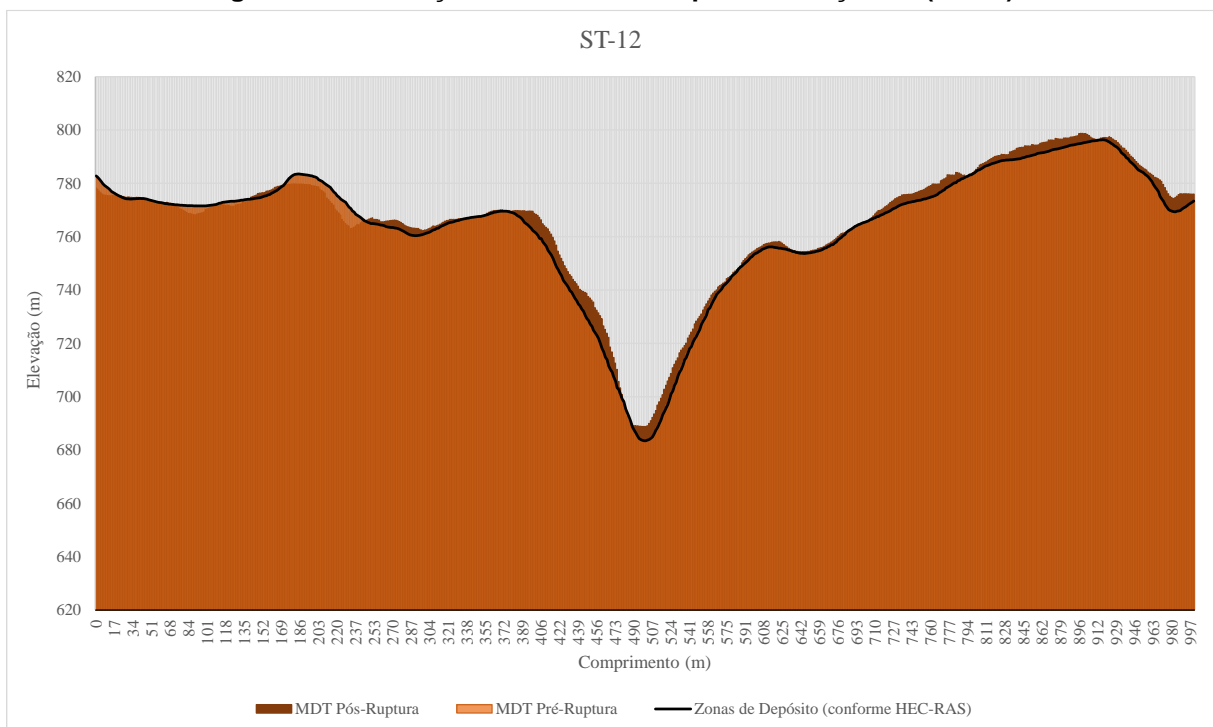
Fonte: Autora (2022)

Figura 93 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 11 (ST-11)



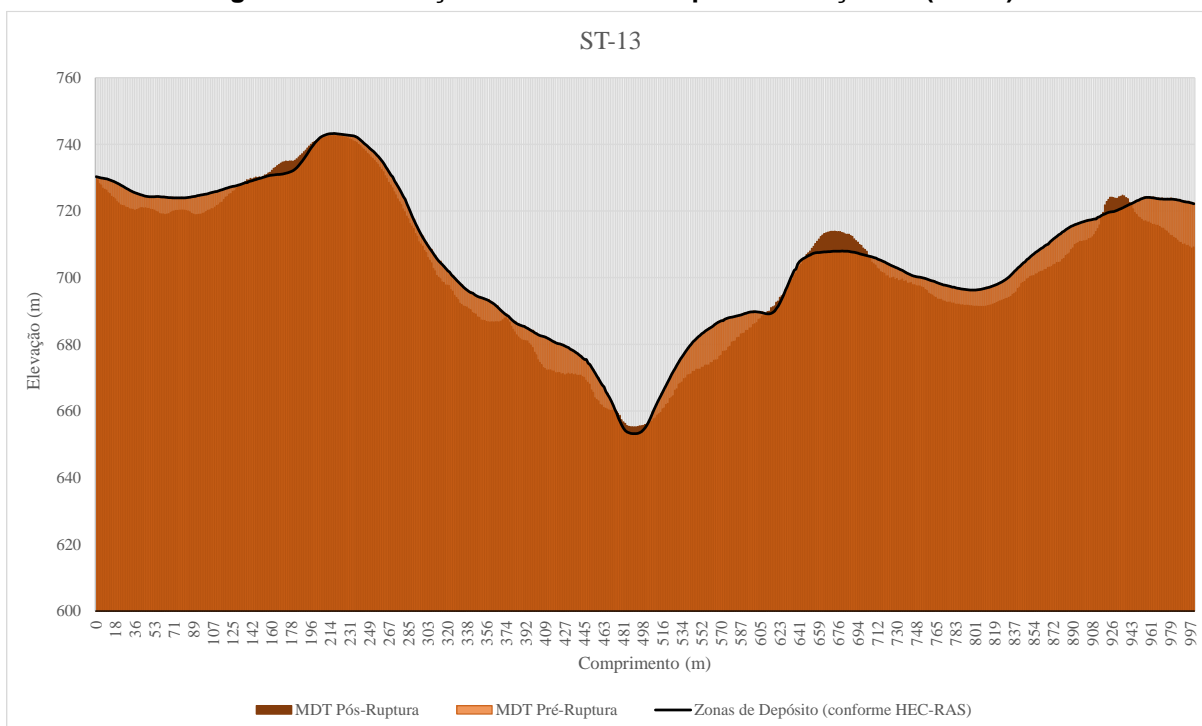
Fonte: Autora (2022)

Figura 94 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 12 (ST-12)



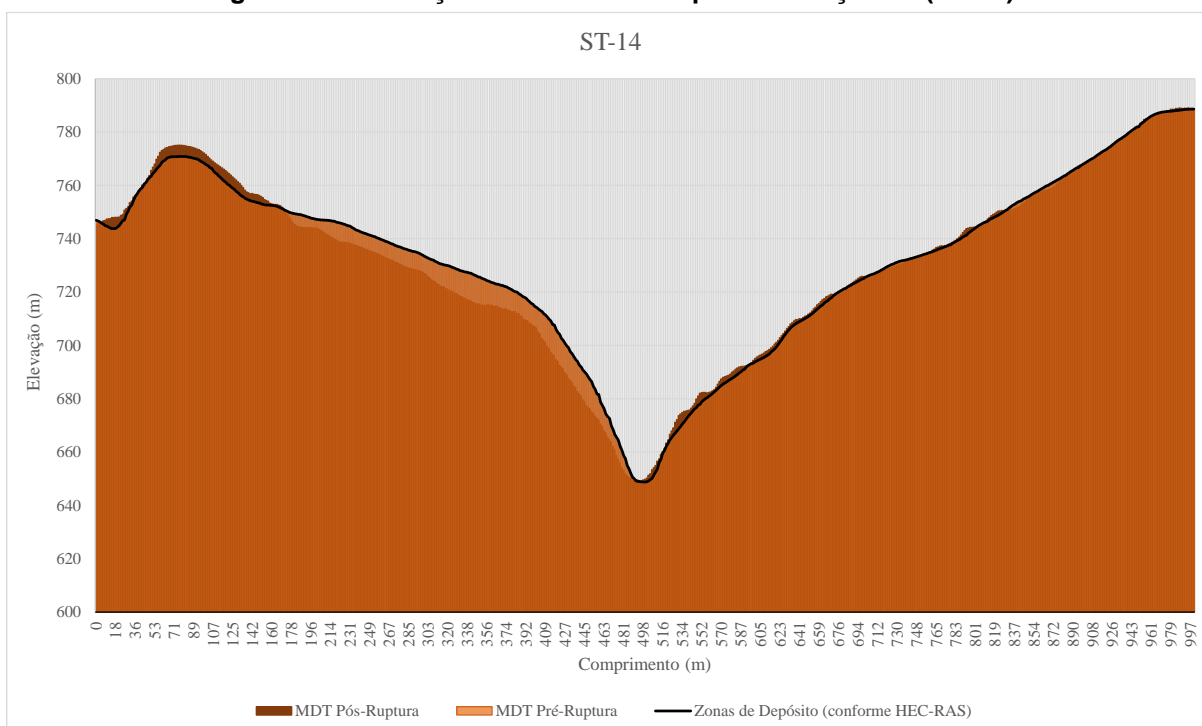
Fonte: Autora (2022)

Figura 95 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 13 (ST-13)



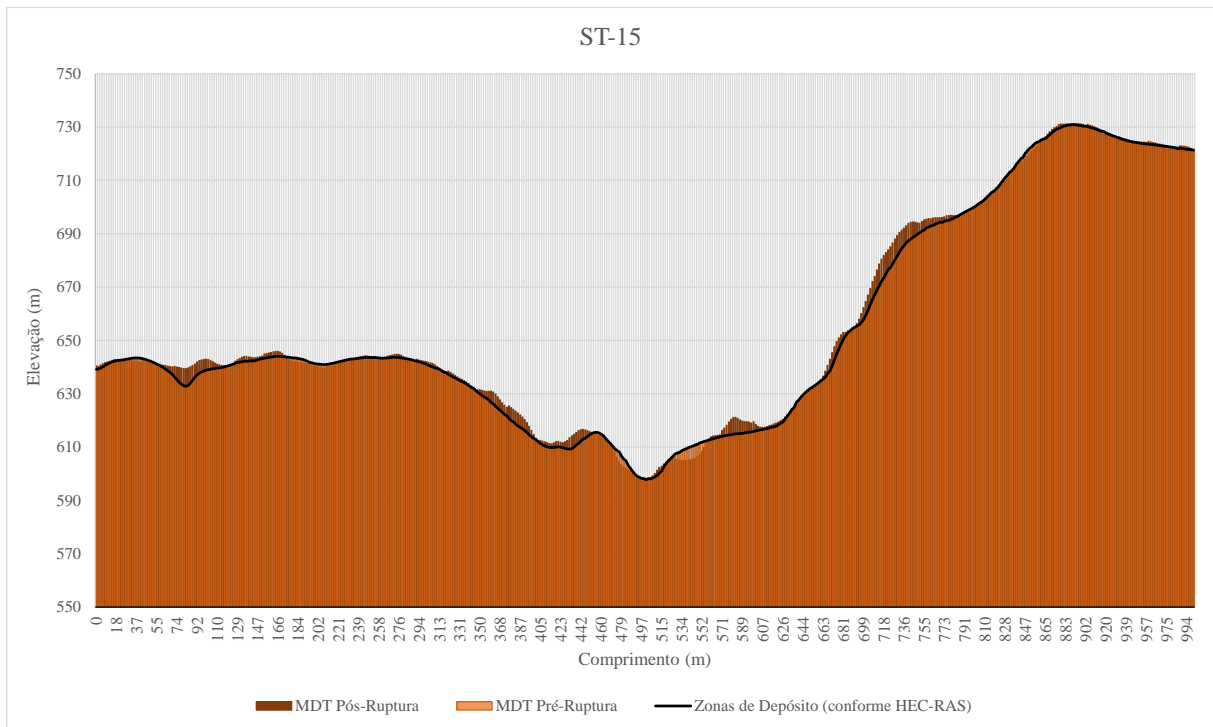
Fonte: Autora (2022)

Figura 96 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 14 (ST-14)



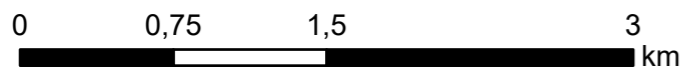
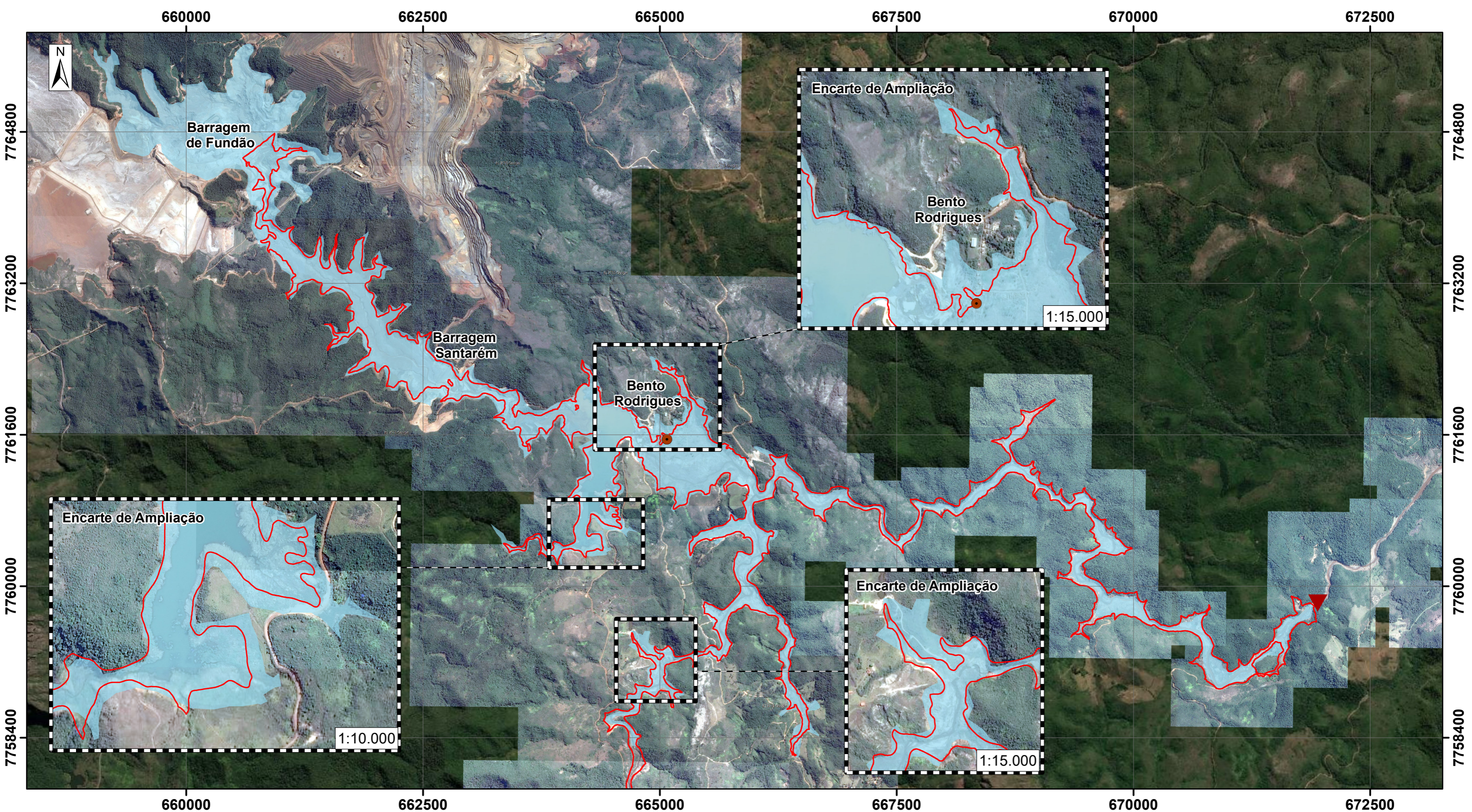
Fonte: Autora (2022)

Figura 97 – Avaliação das zonas de depósito – Seção 15 (ST-15)



Fonte: Autora (2022)

APÊNDICE D – Mapas de Inundações



Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

- Ponto de Parada Modelagem
- Mancha de Inundação - Cenário 1
- Distritos
- Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

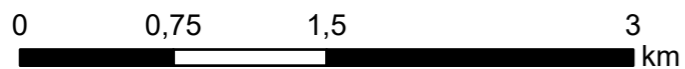
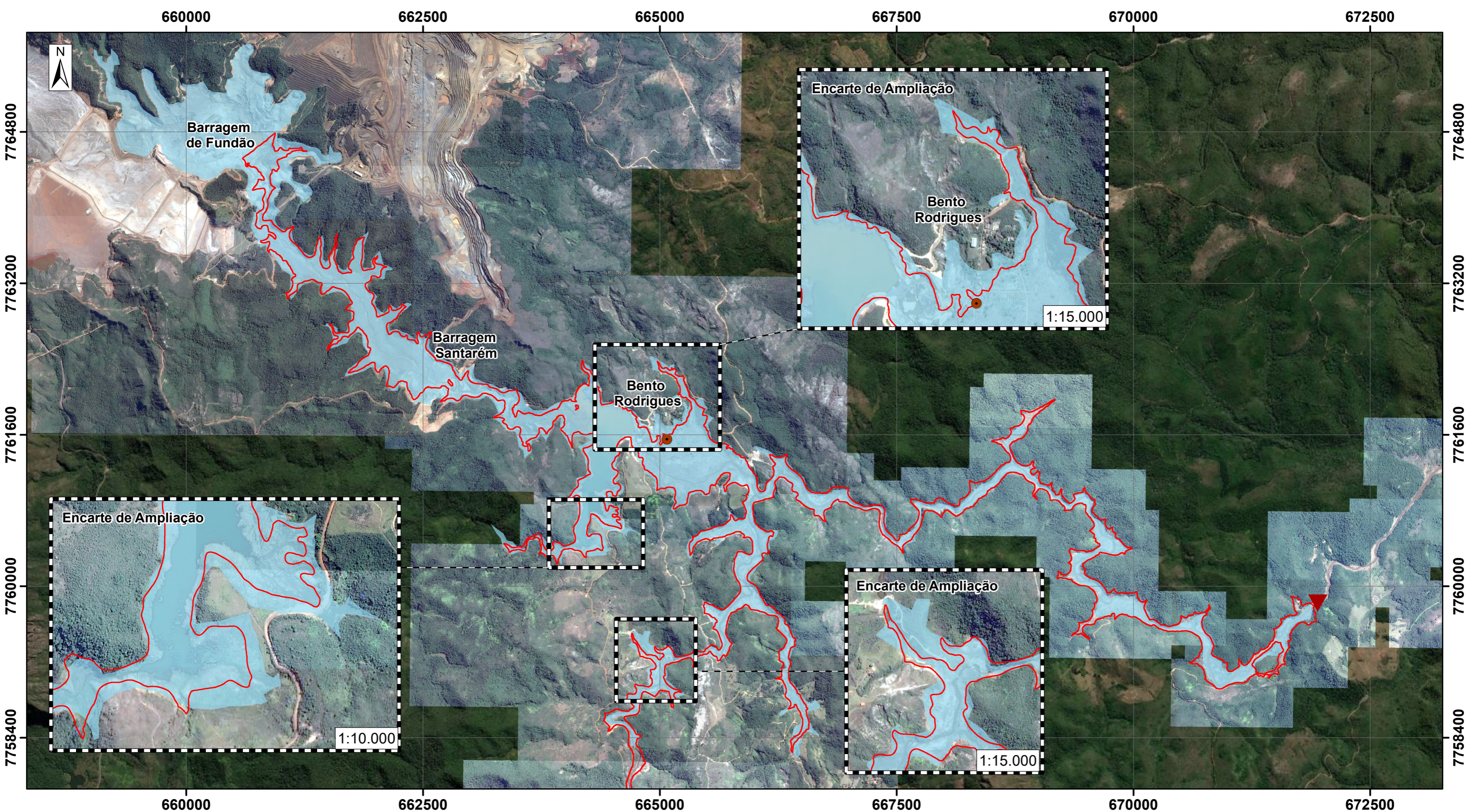
**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 1 - Fluido Aquoso

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3



Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

- Ponto de Parada Modelagem
- Mancha de Inundação - Cenário 2
- Distritos
- Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

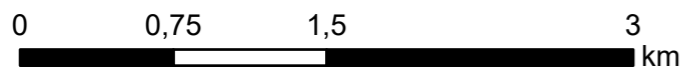
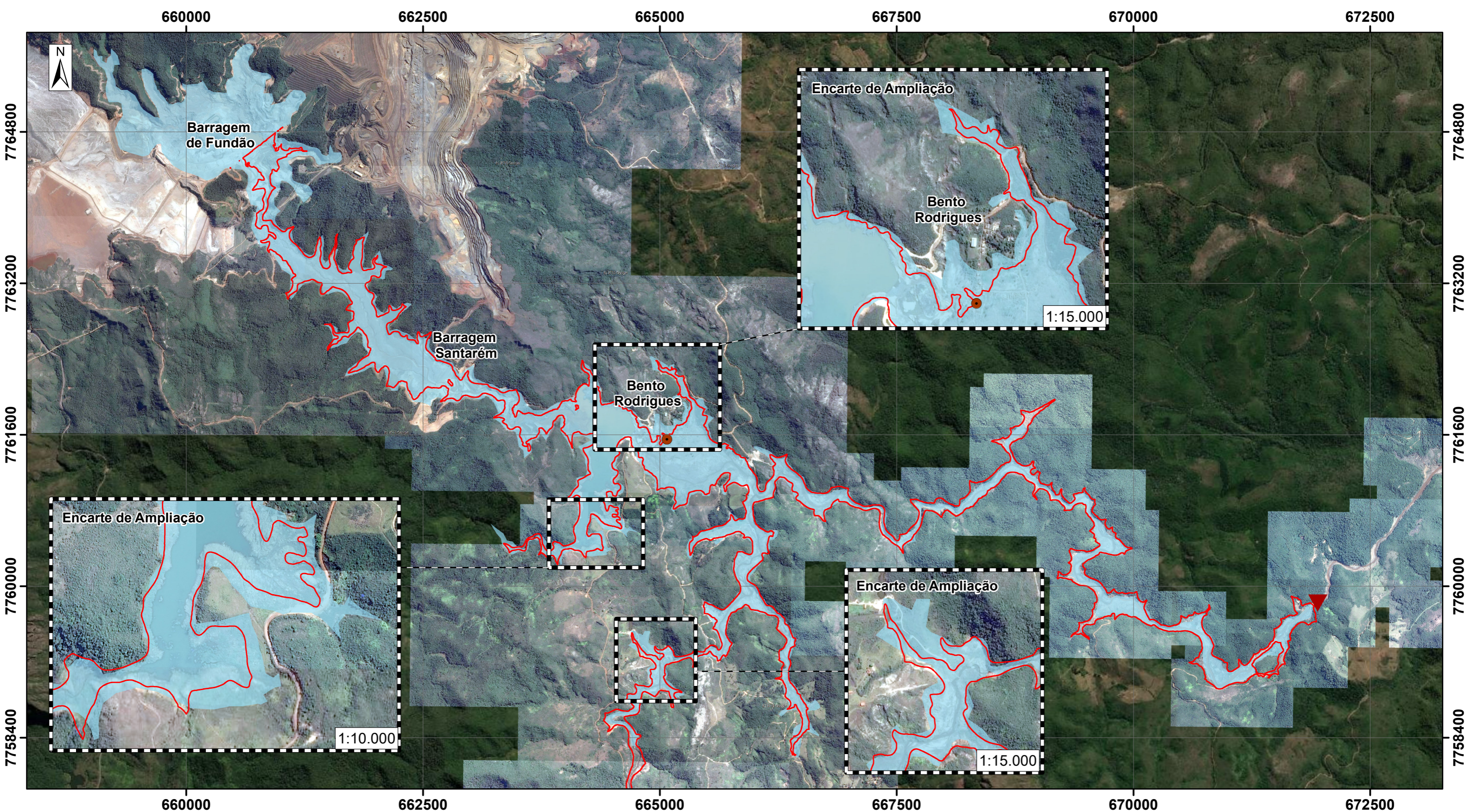
**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 2 - Fluido
Hiperconcentrado

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3



Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

-  Ponto de Parada Modelagem
-  Distritos
-  Mancha de Inundação - Cenário 3
-  Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

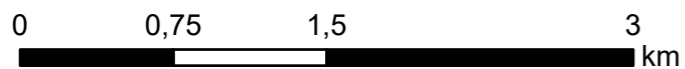
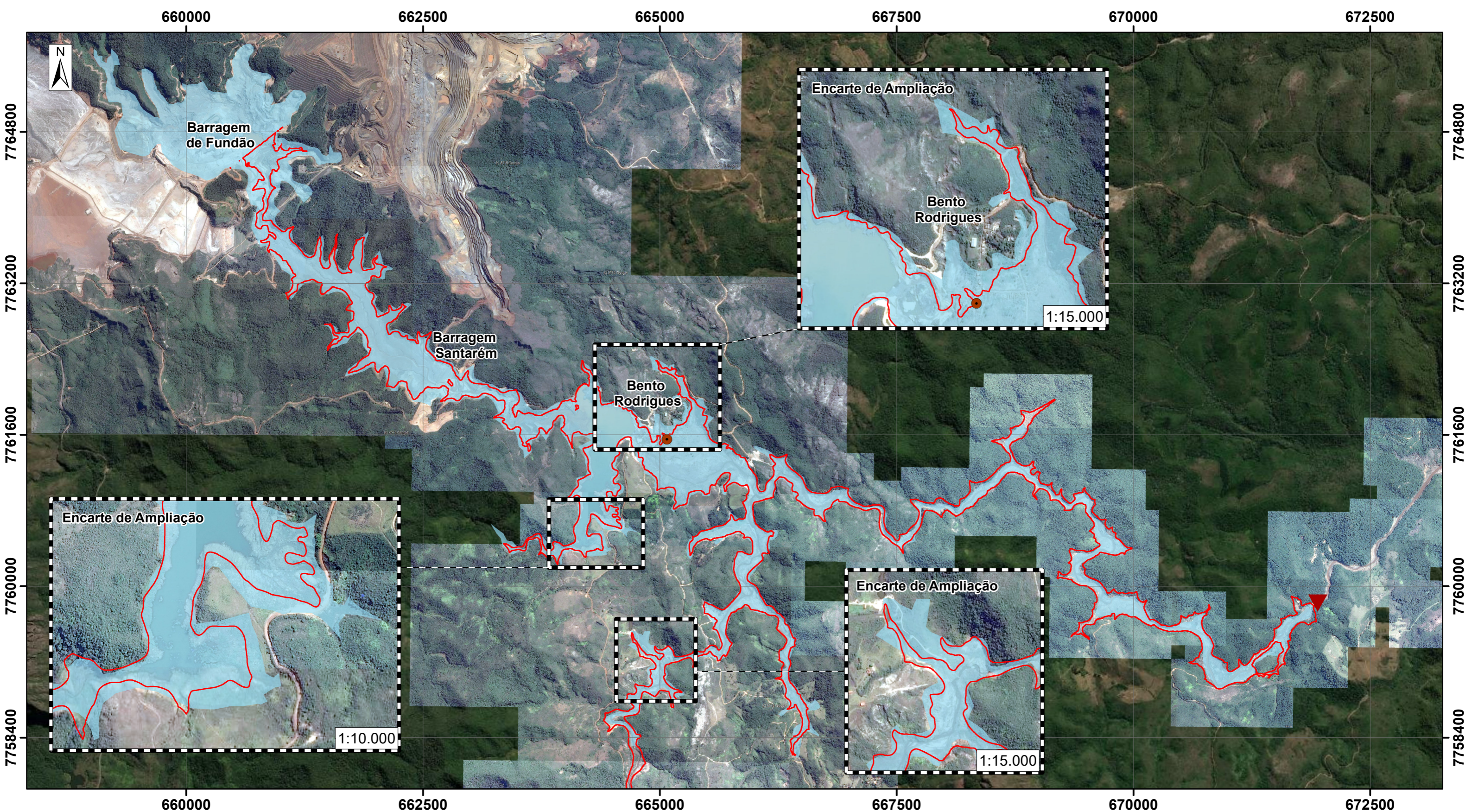
**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 3 - Inserção dos
Parâmetros de Transporte de Sedimentos

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3



Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

- Ponto de Parada Modelagem
- Distritos
- Mancha de Inundação - Cenário 4
- Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

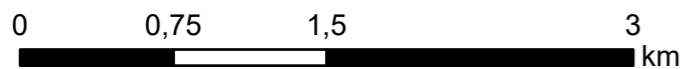
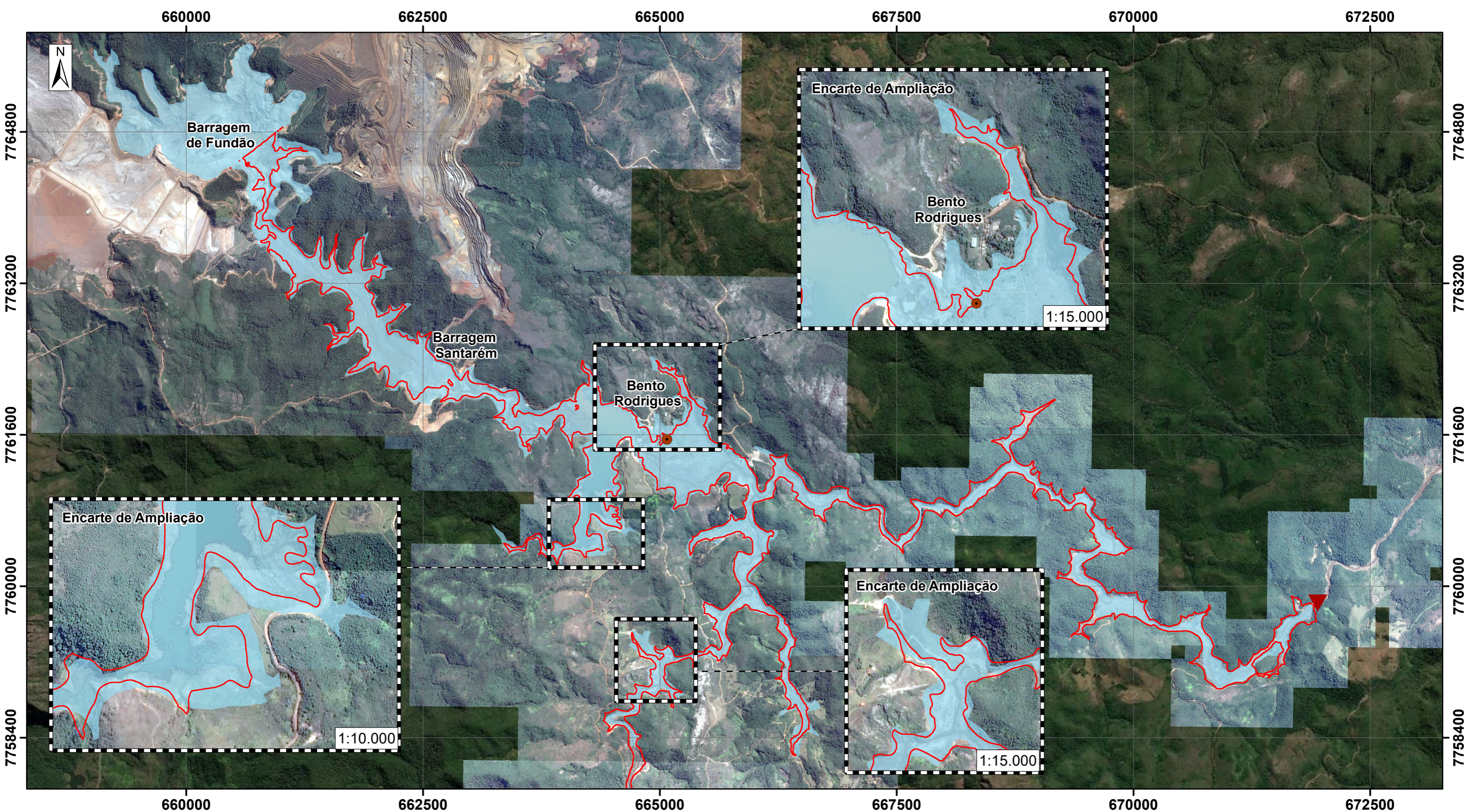
**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 4 - Inserção dos
Parâmetros de Transporte de Sedimentos

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3



Escala: 1:37.000

Projeção UTM Fuso 23S
Datum SIRGAS 2000

Imagem Google Earth
referente a julho e agosto de
2016, complementada ESRI.

Legenda

- Ponto de Parada Modelagem
- Mancha de Inundação - Cenário 5
- Distritos
- Mancha Real Observada



Programa de Pós-graduação em Saneamento,
Meio Ambiente e Recursos Hídricos UFMG

**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
NA RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Envoltória Máxima de Inundação - Cenário 5 - Inserção dos
Parâmetros de Transporte de Sedimentos

Autora:
Bruna Carolina de Melo Almeida

Data:
Agosto/2022

Formato impressão:
A3