



## Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem

### Barragem B2 e B2A

### Complexo de Fernandinho

### Rio Acima/MG



Elaboração	Aprovação	Documento Nº	Revisão	Data
TC	AC	CSN-F3-RL-003-00 MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_0	Emissão Inicial	04/12/23
AC	AC	CSN-F3-RL-003-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_1	Revisão 01	03/10/24
AC	AC	CSN-F3-RL-003-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2	Revisão 02	29/11/24

 	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDEDOR .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDIMENTO .....</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>ENDEREÇO PARA ENVIO DE CORRESPONDÊNCIA .....</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DOS RESPONSÁVEIS TÉCNICOS PELA ELABORAÇÃO DO ESTUDO DE RUPTURA 4</b>	
<b>7</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM .....</b>	<b>5</b>
7.1	DADOS DISPONIBILIZADOS E UTILIZADOS NOS ESTUDOS .....	5
7.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS .....	6
7.3	BARRAGEM B2A.....	7
7.4	BARRAGEM B2 .....	11
7.5	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DO REJEITO .....	15
<b>8</b>	<b>REQUISITOS, PREMISSAS E CONTEÚDO MÍNIMO PARA OS ESTUDOS DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGENS .....</b>	<b>17</b>
8.1	SÍNTESE METODOLÓGICA .....	17
8.2	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	23
8.3	ESTUDOS HIDROLÓGICOS.....	24
8.4	HIDROGRAMA DE RUPTURA .....	34
8.5	PROPAGAÇÃO DE HIDROGRAMAS .....	45
8.6	RESULTADOS DO ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA.....	55
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>66</b>
<b>10</b>	<b>REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXO I .....</b>	<b>68</b>

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## 1 Introdução

O presente relatório refere-se ao Estudo de Ruptura Hipotética das Barragens B2 e B2A, em atendimento à Resolução nº 95 de 7 de fevereiro de 2022 da Agência Nacional de Mineração (ANM) e em consonância com a Política Estadual de Segurança de Barragens de Minas Gerais, Lei nº 23.291 de 25 de fevereiro de 2019.

## 2 Objetivos

O presente estudo de ruptura hipotética das Barragens B2 e B2A, localizadas no município de Rio Acima/MG, foi elaborado com a finalidade de estimar o alcance máximo da inundação (mancha) pelo vale a jusante da estrutura, proveniente de uma eventual ruptura da barragem e mobilização dos rejeitos contidos em seu interior.

Este estudo tem como referência técnica o acompanhamento de diretrizes e recomendações segundo estudos de ruptura hipotética de barragens de entidades como a Agência Nacional de Águas do Brasil (ANA, 2017), a Agência Federal de Gestão de Emergências dos Estados Unidos (FEMA, 2013) e o Comitê de Barragens Canadense (CDA, 2019).

 	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

### 3 Identificação do Empreendedor

Identificação do Empreendedor	
Razão Social	Minérios Nacional S.A.
CNPJ	09.294.881/0001-75
Endereço	Estrada Casa de Pedra, S/Nº (Parte), Zona Rural, Município de Congonhas, Estado de Minas Gerais, CEP: 36.416-330, Caixa Postal: 101
Telefone	(31) 3562-3010
Email	<a href="mailto:thiago.ozorio@csn.com.br">thiago.ozorio@csn.com.br</a>

### 4 Identificação do Empreendimento

Identificação do Empreendimento	
Razão Social	CSN Mineração S.A.
CNPJ	09.294.881/0001-75
Endereço	Rodovia dos Inconfidentes – nº/km 40, Zona Rural, Município de Rio Acima, Estado de Minas Gerais, CEP: 34300-000
Telefone	(31) 3562-3010
Email	<a href="mailto:thiago.ozorio@csn.com.br">thiago.ozorio@csn.com.br</a>
Processo Administrativo COPAM	122/1986/015/2007

### 5 Endereço para Envio de Correspondência

Endereço Para Envio de Correspondência	
Nome	João Batista da Silva – Gerente de Meio Ambiente
Endereço	Estrada Casa de Pedra, S/Nº (Parte), Zona Rural, Município de Congonhas, Estado de Minas Gerais, CEP: 36.410-970, Caixa Postal:101

### 6 Identificação dos Responsáveis Técnicos pela Elaboração do Estudo de Ruptura

Identificação dos Responsáveis pela Elaboração do Estudo	
Nome	Adolfo Tribst Corrêa
CPF	092.849.576-05
Formação	Engenheiro Hídrico
CREA	160.818/MG
Telefone	(11) 98482-1414
Email	<a href="mailto:adolfo.correa@brazilhydro.com">adolfo.correa@brazilhydro.com</a>

 	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
			CSN-F3-RL-003-02
			Nº CSN Mineração
			MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## 7 Identificação e Características da Barragem

### 7.1 Dados disponibilizados e utilizados nos estudos

Durante o desenvolvimento dos trabalhos foram consultados diversos documentos para subsídio dos estudos. Apresentam-se na Tabela 7.1 uma síntese dos dados disponibilizados pela Minérios Nacional e utilizados no estudo.

Tabela 7.1 – Dados disponibilizados e utilizados no estudo

Doc.	Código / Referência	Descrição	Revisão/Data
1	HID23-CSN-017-RTE-005-Rev1.pdf HID23-CSN-017-RTE-006-Rev1.pdf	Complexo Fernandinho – Verificação Hidráulica do Sistema Extravasor para PMP Barragens B2 e B2A	Julho/23
2	MIPE_H_RT_B2A_2023_08_0	Auditoria Extraordinária De Segurança – Ano Base 2023/2 Barragem B2A	Agosto/23
3	MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_2023_06	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragens – Relatório Técnico – Barragem B2 e B2A	Agosto/23
4	Dados de instrumentação 22_08_2023 08_04_57_B2A	Dados de Instrumentação da Barragem B2A	Agosto/23
5	FG-2069-CSN-R-BA03 - Ensaios B2A MIPE_H_DAM_B2A_RT04_2021_08	Ensaios Reológicos Barragem B2 Auxiliar	Julho/231
6	FGE-14-001-RER-01.pdf FGE-14-001-RER-03.pdf	Ensaios Reológicos Barragem B2	Novembro/23
7	MIPE_H_RT_B2_2023_08_0.pdf	Auditoria Extraordinária De Segurança – Ano Base 2023/2 Barragem B2	Agosto/23
8	Dados de instrumentação 22_08_2023 09_00_30_B2	Dados de Instrumentação da Barragem B2	Agosto/23
9	Anexo A-PLANO DE CHUVA - BARRAGEM B2A MINÉRIOS NACIONAL	Plano de Chuva 2023/2024	Agosto/23
10	316_22_Relatorio_final CSN.pdf CN_FND_AEROSAT_MDT_ADJUST.DWG	Topografia do Vale de Jusante	Outubro/22
11	Curvas_1M.dxf	Topografia das Barragens B2 e B2A	Agosto/23
12	PRIMITIVO BARRAGENS FERNANDINHO.dwg	Primitiva das Barragens B2 e B2A	-
13	SGS/GEOSOL Nº 2400034-0	Ensaio do Rejeito ABNT/NBR 10.004	Janeiro/24
14	MIPE_H_PAE_B2_2024_09 MIPE_H_PAE_B2A_2024_09	PAEBM – Barragens B2 e B2A	2024

	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	<b>Nº Brazil Hydro</b>
		CSN-F3-RL-003-02
		<b>Nº CSN Mineração</b>
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## 7.2 Características Gerais

As Barragens B2 e B2A estão localizadas no Complexo Fernandinho, no município de Rio Acima, no Estado de Minas Gerais, sob as coordenadas UTM 7.770.215 S e 620.402 E (Datum SIRGAS 2000, Zona 23S). A Figura 7.1 apresenta a localização do empreendimento.

As Barragens B2 e B2A interceptam o Córrego Fazenda Velha, inserido na bacia hidrográfica estadual do Rio das Velhas, que por sua vez faz parte da bacia hidrográfica federal do Rio São Francisco. A região se encontra na cabeceira da bacia do Rio das Velhas, em que, um pouco mais a leste é a divisa com a bacia federal do Rio Doce (Doc. 1).

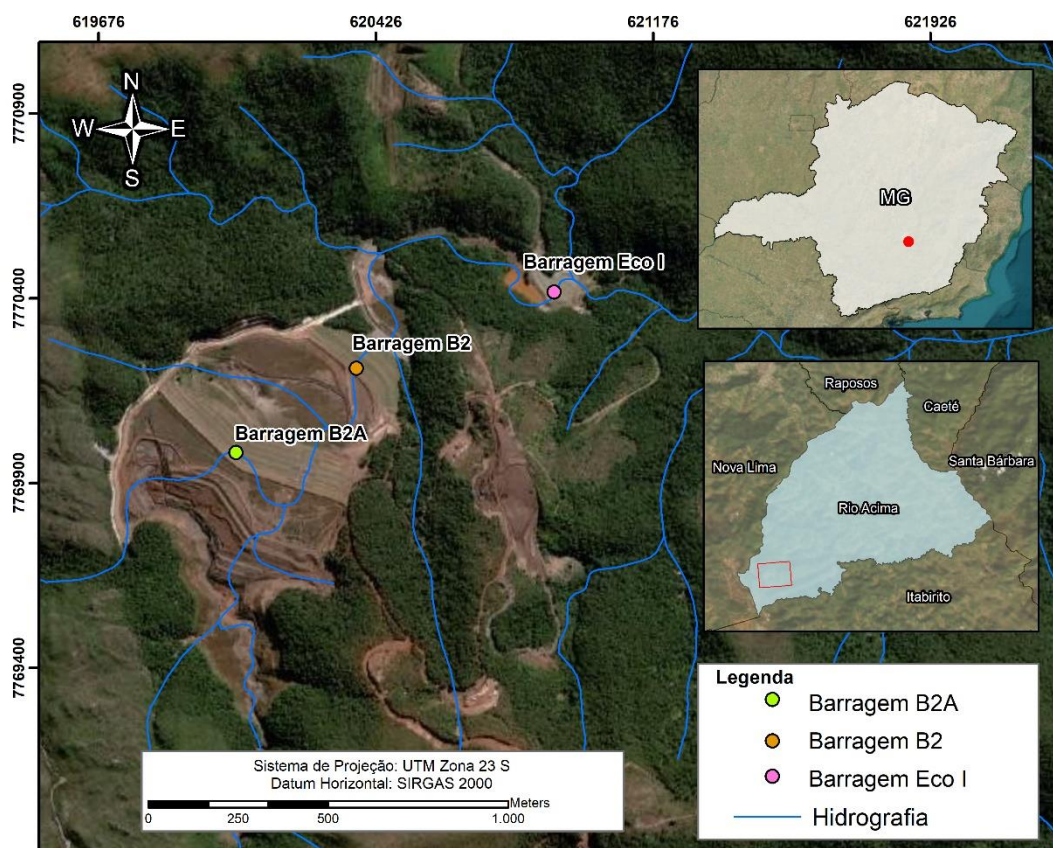


Figura 7.1– Localização das Barragens B2, B2A e Barragem Ecológica I

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

### 7.3 Barragem B2A

O sistema de armazenamento de rejeitos foi construído para contenção dos rejeitos provenientes do processo de beneficiamento do minério de ferro e das contribuições totais do Córrego Trovões e Córrego Fazenda Velha. A estrutura entrou em operação em 1994 e foi operada até o ano de 2014 (Doc. 2). Atualmente, a barragem está inativa, e, portanto, não recebe mais rejeitos. Devido aos Fatores de Segurança (FS) abaixo das normas vigentes, este sistema está passando por obras de estabilização.

Conforme o Doc. 3, a Barragem Auxiliar (B2A) fica a montante da Barragem B2, e apresenta diques alteados a montante com seção homogênea com material do aterro apresentando textura silto-arenosa com argila a silto-argilosa, assim como fragmentos de xistos em meio à matriz.

O maciço da barragem B2A é composto por um dique de partida e mais 7 maciços de aterro alteados para montante sobre o rejeito inconsolidado de minério de ferro. A barragem encontra-se com crista na elevação mínima de 936,00 m. Os taludes de jusante apresentam inclinação variando entre 1,0V:2,0H e 1,0V:3,0H. Já os taludes de montante apresentam inclinação de 1,0V:2,0H. A crista apresenta largura de 6,0 m e extensão total de 650,0 m. A Figura 5.2 apresenta a Planta da Barragem B2A (Doc. 3).

O sistema extravasor atual da Barragem B2A é composto pelo emboque lateral (*side channel*) com 24 m de largura de base, taludes com inclinação 6H:1V e altura de aproximadamente 0,60 m, revestido em geomembrana de PEAD. O emboque lateral apresenta soleira na elevação 932,0 m e deságua no canal de cintura, implantado na margem esquerda do reservatório da barragem. Além do emboque lateral, a barragem B2A possui bueiro de serviço com geratriz inferior na cota 929,26 m, diâmetro de 600 mm e que deságua na descida do canal de cintura.



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

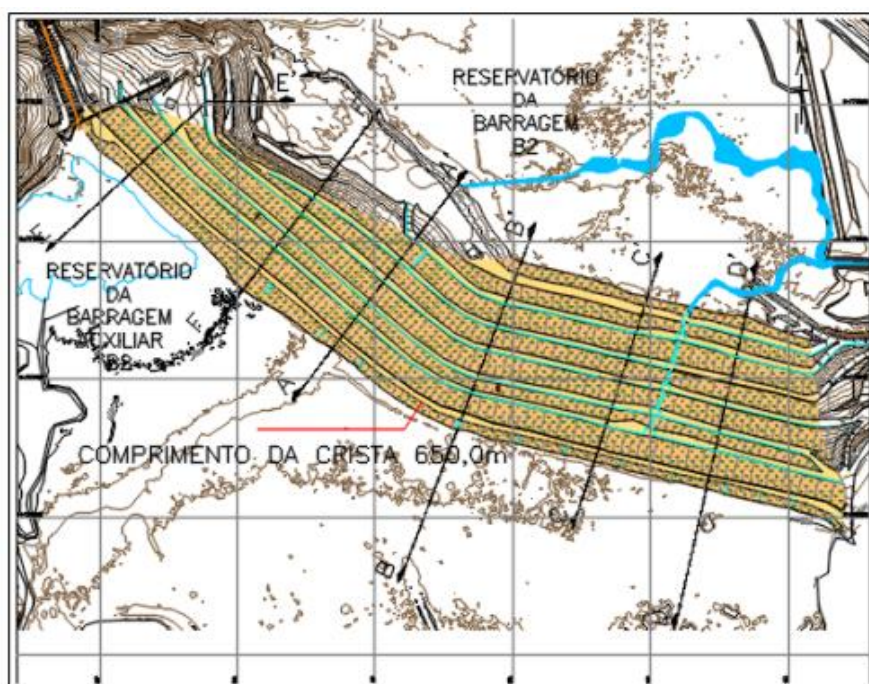


Figura 7.2 - Planta da Barragem B2A

Tabela 7.2 – Principais características da Barragem B2A (Doc. 2)

Características Técnicas	
Barragem (Tipo)	Rejeito Compactado
Método de Alçamento	07 alteamentos, método a montante
Finalidade	Disposição de rejeitos
Altura Atual da Barragem (m) considerando maciço exposto a jusante (m), conforme Resolução Federal nº 95/2022 da ANM	~32,50
Largura da Crista (m)	4,00 a 5,00
Elevação Crista (m)	936,00
Elevação (m) do terreno natural no ponto baixo do barramento (m)	864,60
Capacidade Total do reservatório (m³)	2.785.859,00
Área do reservatório (m²)	194.086,00
Área da Bacia do Reservatório (m²)	1.748.468,00
Curso d'Água interceptado	Sim, Córrego Fazenda Velha
Bacia Hidrográfica	UEG-1 - Afluentes do Alto Rio São Francisco
Volume disponível para amortecimento (m³)	961.350,00
Cota da soleira do vertedouro (m)	932,00
Vazão Máxima do Sistema Extravasador - TR 10.000 anos (m³/s)	15,90
Elevação N.A máximo Maximorum – TR 10.000 anos (m)	932,5



	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	Nº Brazil Hydro
		CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Características Técnicas	
Borda livre remanescente - TR 10.000 anos (m)	3,45
Vazão Máxima do Sistema Extravasor - PMP (m3/s)	26,81
Elevação N.A máximo Maximorum – PMP (m)	932,65
Borda livre remanescente - PMP (m)	3,35

Atualmente, a Barragem B2A conta com 86 instrumentos de monitoramento, sendo eles: 30 indicadores de nível de água (INA), 23 piezômetros, 22 Marcos superficiais (MS), 11 medidores de vazão (Figura 7.3). Para avaliar o comportamento da linha freática do maciço, foram analisados os instrumentos da Seção C-C (Doc. 4), conforme indicado na Figura 7.4 e Tabela 7.3, período de 2018 a 2023.

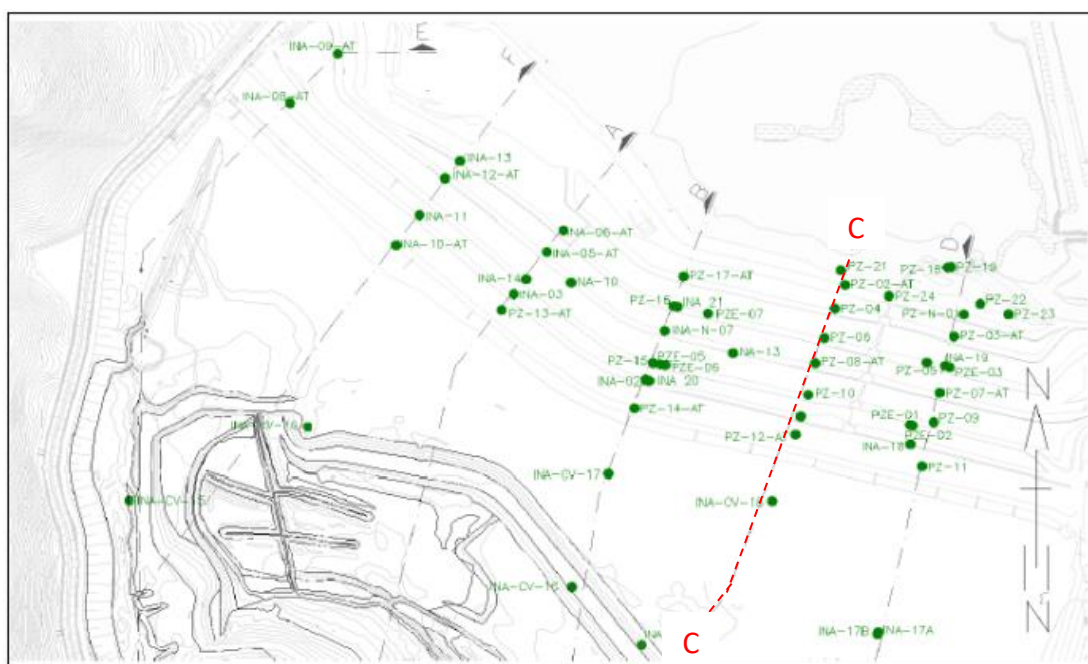


Figura 7.3– Localização da Instrumentação da Barragem B2A (Doc. 2)

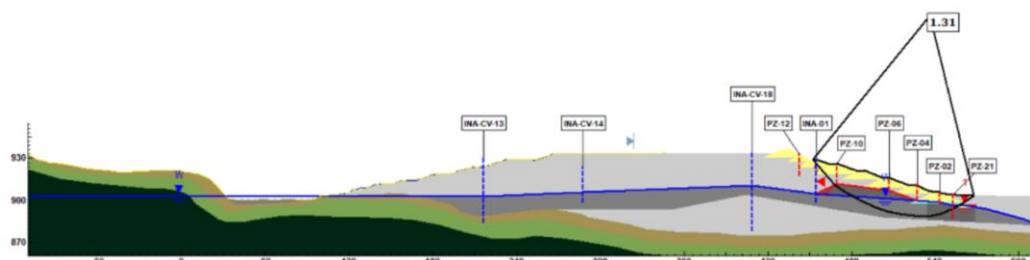


Figura 7.4– Seção C-C com destaque para Linha freática (Doc. 2)

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Tabela 7.3 – Leituras dos instrumentos instalados na seção C-C (Doc. 4)

Seção C-C			
Instrumentos	Cota de Fundo (m)	Cota Piezométrica (m)	Data
INA-B2A-01	898,33	904,44	18/08/2023
PZ-B2A-02-AT	897,78	898,71	22/08/2023
PZ-B2A-04	900,07	900,07 (Seco)	17/08/2023
PZ-B2A-06	907,06	907,06 (Seco)	17/08/2023
PZ-B2A-08-AT	910,07	319,98 (Desativado)	21/02/2022
PZ-B2A-10	911,26	911,76	18/08/2023
PZ-B2A-12-AT	916,66	916,66 (Seco)	18/05/2022
PZ-B2A-21-B	890,41	Não disponibilizado	-
PZ-B2A-24	884,92	Não disponibilizado	-
INA-CV-16	893,52	915,87	18/08/2023

Nota-se que alguns instrumentos instalados na Seção C-C apresentam variação em função da pluviometria. Os instrumentos PZ-B2A-04, PZ-B2A-06 e PZ-B2A12AT apresentaram-se secos. Ademais, apresentaram uma redução na linha freática (PZ-B2A-10, PZ-B2A-04, INA-B2A-01 e PZ-B2A-02AT), conforme apresentado na Figura 7.5. Todos os instrumentos estão dentro dos níveis de segurança classificados como normal durante o período analisado.

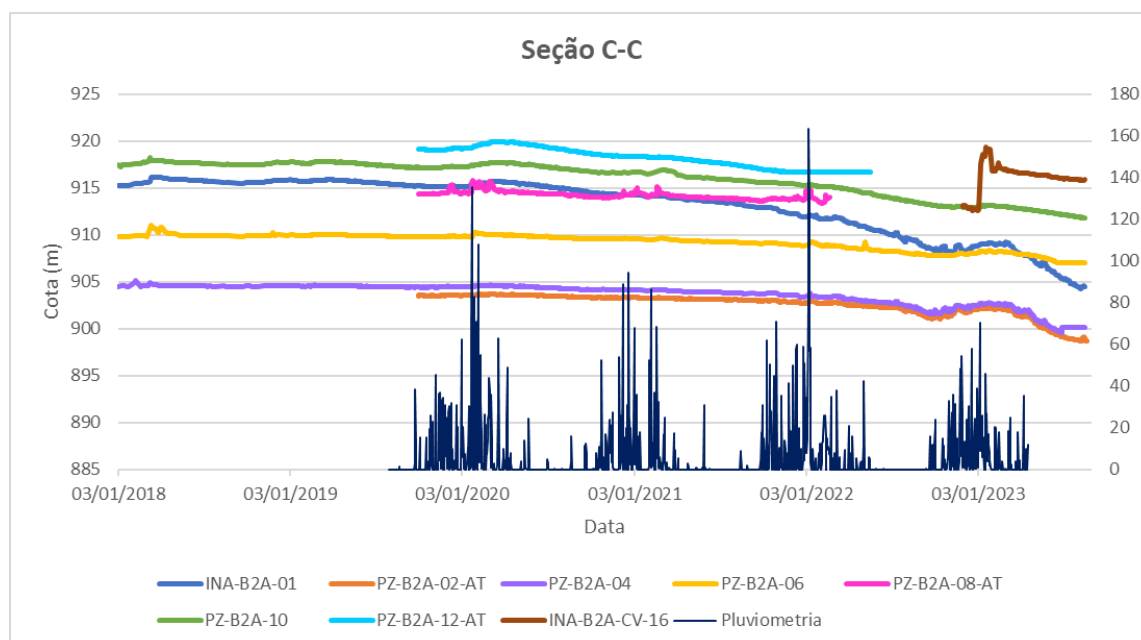


Figura 7.5 – Avaliação do comportamento dos instrumentos da Seção C-C (Doc. 4)

Durante a auditoria do ano base de 2023/2 (Doc. 2), foram realizadas análises de estabilidade em condições estáticas, não-drenada (pico), pseudoestáticas e liquefeita

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

das seções principais da estrutura, considerando os dados de instrumentação para determinação da superfície freática e de investigações geológicas-geotécnicas existentes.

O resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade indica que, em algumas seções, os fatores de segurança encontrados não estão adequados conforme a NBR 13028 (ABNT, 2017) para condições estáticas não drenada, pseudoestáticas, atingindo níveis não satisfatórios e indicando condições desfavoráveis de estabilidade do maciço. Segundo a resolução ANM 95/2022 a Barragem B2A é classificada em nível 1.

Em janeiro de 2024 foram realizados novos ensaios para caracterização dos rejeitos dispostos no reservatório da Barragem B2A segundo a ABNT/NBR 10.004 (Doc. 13), no qual apresenta a classificação como Classe II-B.

## 7.4 Barragem B2

Conforme indicado no Doc. 7, o sistema de armazenamento de rejeitos foi construído para receber a disposição de rejeitos de processo de beneficiamento da Minérios Nacional. A estrutura entrou em operação em 1989 e foi operada até 2014.

A Barragem B2 foi construída com dois alteamentos a montante, apoiados sobre rejeito do reservatório. O maciço inicial da estrutura teve sua crista na El. 892,0 m e posteriormente, os alteamentos a montante da Barragem B2 foram realizados com crista intermediária na El. 899,00 e crista final na El. 905,6 m. No alteamento final, a crista da barragem foi deslocada em aproximadamente 70 m para montante, com a formação de uma bacia. A inclinação média do talude de jusante é de 22°.

A fundação da barragem é constituída por solos saprolíticos no maciço inicial e rejeitos adensados nos alteamentos de montante. O talude jusante possui inclinação 1V:3H a 1V:5H, entre bancos cuja bermas possuem cerca de 3,00 a 7,00 m, com altura de até 13,00. A inclinação geral varia entre 18° a 21°.

Entre 2013 e 2016 a barragem passou diversos processos de readequação, visando aumentar a estabilidade estrutural, a partir da regularização do maciço, vertedouro e

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

sistema de drenagem superficial. Em 2019 foi executado um canal de cintura em geomembrana PEAD e descida d'água em concreto, e posteriormente, obras de execução da berma de enrocamento na Barragem B2.

O sistema extravasor da Barragem B2 foi implantado na ombreira direita do barramento, e é constituído por um vertedouro em canal aberto, forma trapezoidal, revestido em concreto, com soleira na El. 903,20 m. O canal tem 5,2 m de base e taludes laterais com inclinação de 1V:1H. Posteriormente, foi realizada uma adequação na base do canal, sendo escavada uma vala, preenchida em enrocamento, para implantação de tubulação corrugada perfurada em PEAD, com a função de permitir o esgotamento dos volumes acumulados no reservatório na época de estiagem ou baixa vazão afluente.

Devido aos elevados índices pluviométricos registrados no estado no mês de janeiro de 2022, foi necessário readequar o extravasor na ombreira direita da Barragem B2. O sistema extravasor construído é composto por um canal trapezoidal com 6,00 m de base e 3,65 m de altura, com uma inclinação de 1V:1,5H, seguido de uma passagem a vau com a mesma dimensão de base, com inclinação de 1V:7,6H. Constituído por geocélula ancorada preenchida por concreto. A Tabela 7.4 apresenta as principais características da estrutura.

Tabela 7.4 – Principais características da Barragem B2 (Doc. 7)

Características Técnicas	
Barragem (Tipo)	Rejeito Compactado
Método de Alçamento	02 alteamentos, método a montante
Finalidade	Disposição de rejeitos
Altura (m)	41,00
Largura da Crista (m)	5,00 a 6,00
Elevação (m) do terreno natural no ponto baixo do barramento (m)	864,60
Capacidade Total do reservatório (m³)	304.143,00
Área do reservatório (m²)	675,00
Área da Bacia do Reservatório (m²)	188.462,00
Curso d'Água interceptado	Sim, Córrego Fazenda Velha
Bacia Hidrográfica	UEG-1 - Afluentes do Alto Rio São Francisco

	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	<b>Nº Brazil Hydro</b>
		<b>CSN-F3-RL-003-02</b>
		<b>Nº CSN Mineração</b>
		<b>MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2</b>

Características Técnicas	
Área da bacia de Contribuição (km <sup>2</sup> )	28,50
Volume disponível para amortecimento (m <sup>3</sup> )	303.709,00
Cota da soleira do vertedouro (m)	899,00
Vazão Máxima do Sistema Extravasor - TR 10.000 anos (m <sup>3</sup> /s)	13,73
Elevação N.A máximo Maximorum – TR 10.000 anos (m)	899,64
Borda livre remanescente - TR 10.000 anos (m)	5,76
Vazão Máxima do Sistema Extravasor - PMP (m <sup>3</sup> /s)	3,02
Elevação N.A máximo Maximorum – PMP (m)	899,30
Borda livre remanescente - PMP (m)	6,10

O monitoramento geotécnico da Barragem B2 é composto por 33 instrumentos instalados no coroamento e berma da estrutura, sendo: 21 Piezômetros (PZ), 02 Indicadores de Nível D'Água (INA), 09 Marcos Superficiais (MS) e 01 Medidor de Vazão (MV). A Figura 7.6 apresenta a localização dos instrumentos instalados na barragem.

Para avaliar o comportamento da linha freática do maciço, foram analisados os instrumentos da Seção C-C, conforme indicado na Figura 7.7 e Tabela 7.5, período de 2018 a 2023.

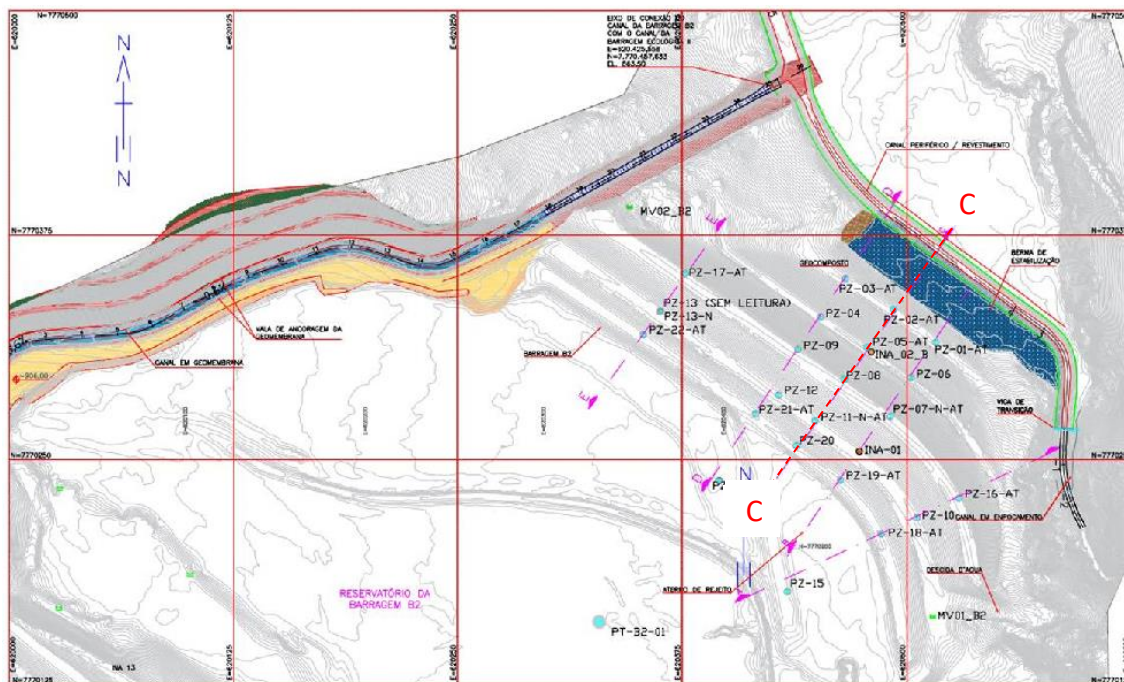


Figura 7.6– Localização da Instrumentação da Barragem B2 (Doc. 7)

	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	<b>Nº Brazil Hydro</b>
		<b>CSN-F3-RL-003-02</b>
		<b>Nº CSN Mineração</b>
		<b>MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2</b>

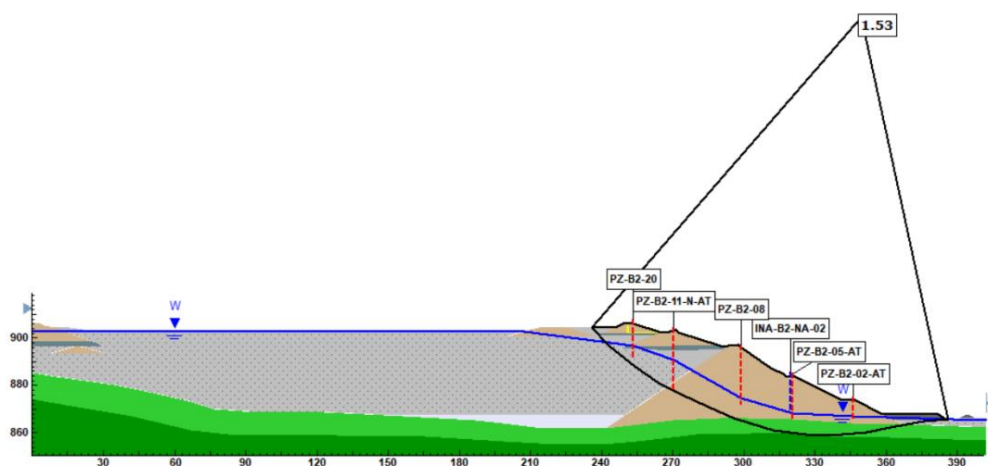


Figura 7.7 – Seção C-C com destaque para Linha Freática (Doc. 7)

Tabela 7.5 – Leitura dos Instrumentos Instalados na Seção C-C (Doc. 8)

Seção C-C			
Instrumentos	Cota de Fundo (m)	Cota Piezométrica (m)	Data
INA-B2-NA-02	867,96	867,96 (Seco)	09/08/2023
PZ-B2-02-AT	864,05	865,78	22/08/2023
PZ-B2-05-AT	864,10	867,08	22/08/2023
PZ-B2-08	871,64	871,64 (Seco)	09/08/2023
PZ-B2-11-N-AT	877,39	888,59	22/08/2023
PZ-B2-20	890,92	893,92	09/08/2023

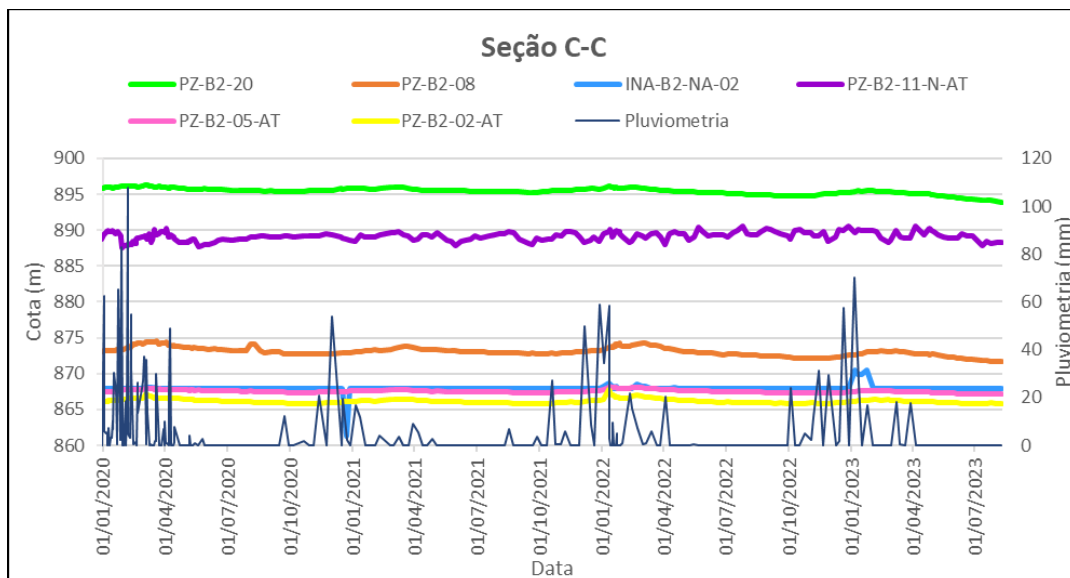


Figura 7.8 – Avaliação do comportamento dos instrumentos da Seção C-C (Doc. 8)



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Nota-se que alguns instrumentos instalados no maciço, na Seção C-C (INA-B2-NA-02 e PZ-B2-08) se mantiveram praticamente secos em alguns períodos, condizente com a pluviometria da região, como apresentado na Figura 7.8. Todos os instrumentos estão dentro dos níveis de segurança classificados como normal durante o período analisado.

Durante a auditoria do ano base de 2023 (Doc.7), foram realizadas análises de estabilidade baseadas na teoria do Equilíbrio Limite de Bishop Simplificado considerando a condição não drenada dos rejeitos e superfície freática determinada pelos instrumentos para o período de inspeção. O resumo dos resultados obtidos nas análises de estabilidade indica que os fatores de segurança obtidos nas análises no cenário de condição não drenada de pico e liquefeita são superiores ao mínimo preconizado, sendo por tanto, estável para condições de liquefação.

Em janeiro de 2024 foram realizados novos ensaios para caracterização dos rejeitos dispostos no reservatório da Barragem B2 segundo a ABNT/NBR 10.004 (Doc. 13), no qual apresenta a classificação como Classe II-B.

## 7.5 Caracterização Reológica do Rejeito

Para definição das características reológicas do rejeito presente no reservatório das Barragens B2 e B2A, foram realizados diversos ensaios de laboratório, principalmente: análise granulométrica, determinação da massa específica dos grãos e determinação das propriedades reológicas (tensões de escoamento), conforme Docs. 5 e 6.

Os rejeitos das Barragens B2 e B2A apresentam-se caracterizados como areno siltoso com vestígios de argila (67% de areia (principalmente fina), 30% de silte, e 3% de argila). A massa específica seca varia entre 3,5 e 3,9 g/cm<sup>3</sup>.

Para os ensaios reológicos da Barragem B2A foram coletadas 4 amostras no reservatório em 2021. A partir do ensaio com reômetro rotacional, variando-se a concentração mássica (Cw) entre 10% e 50%, foram obtidas as tensões de escoamento. O resumo dos resultados dos ensaios está apresentado na Tabela 7.6.

Para os ensaios reológicos da Barragem B2 foi coletada 1 amostra no reservatório em 2023. A partir do ensaio com reômetro rotacional, variando-se a concentração

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

volumétrica (Cv) entre 15% e 55%, foram obtidas as tensões de escoamento. O resumo dos resultados dos ensaios está apresentado na Tabela 7.7.

Adicionalmente para os rejeitos da Barragem B2, foi realizado o *slump test* (teste de abatimento) para algumas concentrações volumétricas mais elevadas, com os resultados fotográficos apresentados na Figura 7.9. Estes demonstram uma massa com características densas, com uma certa dificuldade de deformação (e fluidez), em concentrações acima de 44%.

Tabela 7.6 – Resumo dos ensaios das propriedades reológicas para a Barragem B2A (Doc. 5)

Concentração Mássica Cw (%)	Tensão de Escoamento (Pa)			
	INA P04 F 01	INA P04 F 02	INA P04 F 03	INA P04 F 04
10%	10,2	17,2	8,45	11,9
20%	132	125	126	117
30%	570	560	589	569
40%	1796	1733	1662	1870
50%	2422	2905	2611	2885

Tabela 7.7 – Resumo dos ensaios das propriedades reológicas para a Barragem B2 (Doc. 6)

Concentração Volumétrica - Cv (%)	Tensão de Escoamento (Pa)
55,00%	1706,5
50,00%	1054,9
45,00%	815,51
40,00%	670,07
30,00%	332,08
20,00%	74,06
15,00%	12,07

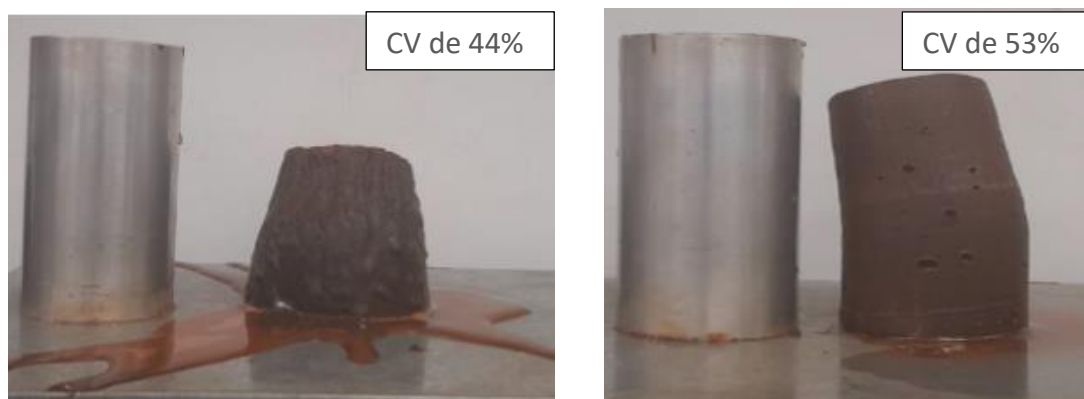


Figura 7.9 – Ensaio de *slump test* para as amostras de rejeito da Barragem B2 (Doc. 6)

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## 8 Requisitos, Premissas e Conteúdo Mínimo para os Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens

### 8.1 Síntese Metodológica

Os estudos de ruptura hipotética iniciam-se com a avaliação dos dados e informações gerais disponíveis para o desenvolvimento dos trabalhos, a partir da qual são instituídas premissas e metodologias aplicáveis de acordo com as condições de contorno e escopo analisadas.

Após etapa de consolidação de dados e informações gerais, procede-se ao cerne dos estudos de ruptura hipotética, respeitando-se três principais etapas: (i) definição do hidrograma de ruptura, (ii) propagação da onda de cheia e (iii) mapeamento da inundação potencial.

Apresenta-se na Figura 6.1 um diagrama que sintetiza esse processo com destaque para algumas atividades.

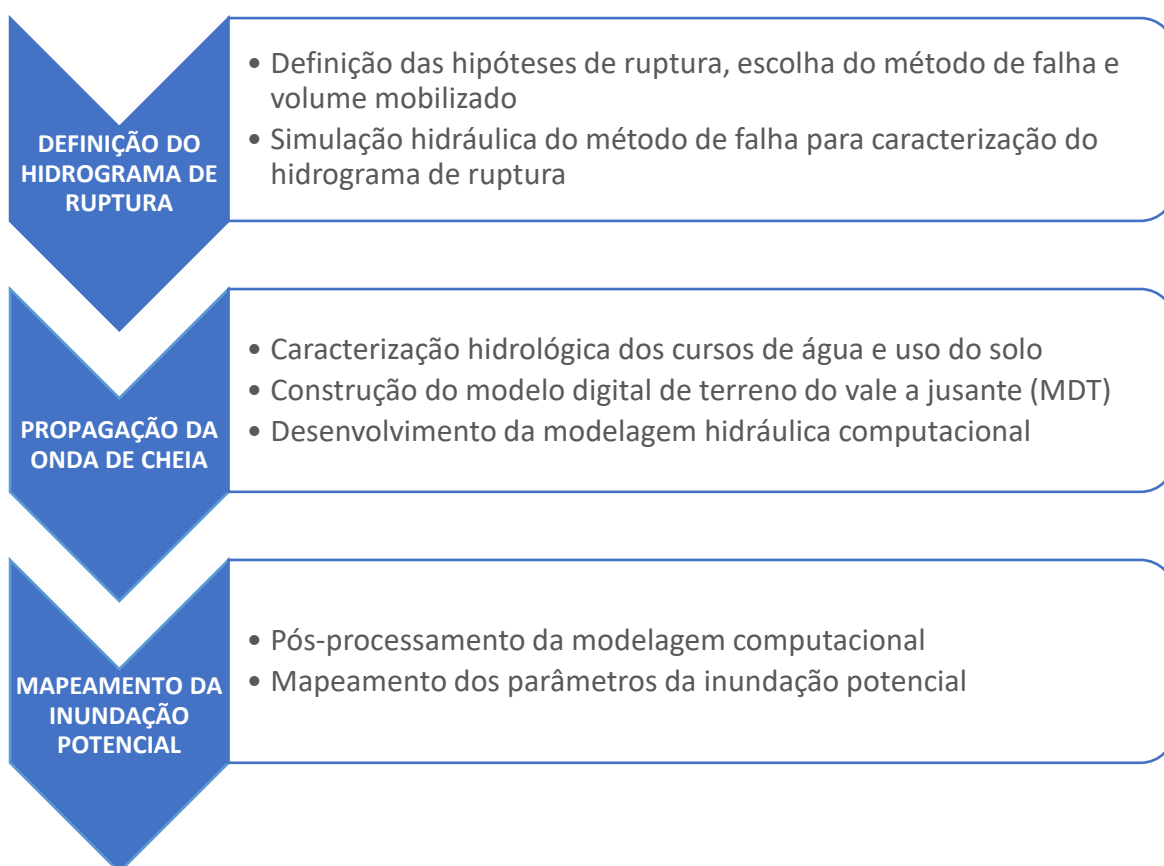


Figura 8.1 – Principais etapas de desenvolvimento dos estudos de ruptura hipotética de volumes mobilizados

 	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

O estudo de ruptura hipotética das Barragens B2 e B2A foi realizado considerando os cenários distintos, sendo:

- **A1 - Cenários sem ruptura:** Em função da ausência de vertimento da Barragem B2A (frente à elevada retenção do escoamento) e da pequena vazão vertida da Barragem B2, além da baixa vazão de cheia regionalizada e a não ocupação do vale do Córrego Fazenda Velha, do esforço computacional para representar um escoamento que não sairá da calha e não terá nenhum incremento aos cenários considerados, este cenário não se justifica de ser simulado e apresentado no presente relatório. Vale ressaltar que as vazões de cheias foram consideradas no Rio das Velhas, somente para a propagação do hidrograma dos cenários de ruptura, devido à sua possibilidade de influência nos cenários com ruptura e nas manchas de inundação. Assim, não há impactos dos vertimentos para jusante das barragens. Mais detalhes são apresentados ao longo do relatório.
- **A2 – Cenários de ruptura propriamente dita:**
  - a) **Ruptura em dia chuvoso (extremo):** Considerando a maior elevação da linha freática nos maciços e reservatórios das Barragens B2 e B2A, aliado a uma cheia crítica na bacia (precipitações intensas), caracterizando como o cenário de maior dano;
  - b) **Ruptura em dia seco (provável):** Considerando a maior elevação da linha freática nos maciços e reservatórios das Barragens B2 e B2A, em um dia de operação comum, sem precipitações;

Em **ambos os cenários de ruptura propriamente dita**, considerou-se a ruptura integral e instantânea das estruturas (ruptura em cascata das Barragens B2 e B2A), com o rompimento integrado e em cascata da Barragem Ecológica I, situada imediatamente à jusante dessas estruturas.

O modo de falha considerado em ambos os cenários de dia chuvoso (extremo) e dia seco (provável) para as Barragens B2 e B2A foi a instabilização dos maciços e liquefação dos rejeitos dos reservatórios (arbitrado como cenário conservador), com a

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

mobilização integral e instantânea dos maciços, rejeitos e água livre, representando uma potencial mobilização de 100% do volume total disponível nas estruturas, sendo 8,93 milhões de m<sup>3</sup> no cenário de dia chuvoso (extremo) e 7,96 milhões de m<sup>3</sup> no cenário de dia seco (provável). Mais detalhes podem ser consultados na Tabela 8.1, em sequência. Para esse tipo de ruptura a formação da brecha é desenvolvida até os limites do terreno em um tempo instantâneo.

A modelagem de ruptura e propagação em ambos os cenários (extremo e provável) foi realizada de maneira integrada (condição de contorno de montante), a partir do *software* RiverFlow2D, considerando o escoamento hiperconcentrado (não-Newtoniano como rejeito), com a utilização da formulação *Turbulent and Yield*, conforme detalhes apresentados no Item 7.2.6. Como condição de contorno de jusante utilizou-se da profundidade normal do Rio das Velhas, após o município de Rio Acima (0,002 m/m).

O MDT utilizado é resultante de uma base topográfica em curvas de níveis equidistantes de metro em metro (processados a um arquivo *Raster* de 1,0 x 1,0 m) proveniente de um perfilamento a laser (Lidar) em acordo com os padrões exigidos na Resolução ANM nº95/22 e em atendimento ao TR da FEAM.

Os rejeitos das Barragens B2 e B2A apresentam-se caracterizados como areno-siltoso com vestígios de argila (67% de areia (principalmente fina), 30% de silte, e 3% de argila). A massa específica seca varia entre 3,5 e 3,9 g/cm<sup>3</sup>. Em relação aos parâmetros reológicos, para o cenário de dia seco (provável) utilizou-se a concentração volumétrica (Cv) de 55%, e para o cenário de dia chuvoso (extremo), optou-se pela utilização de uma concentração volumétrica (Cv) de 50% (menor do que o estimado de 54%, para abarcar as incertezas associadas e trazer um cenário mais conservador possível).

O critério de parada da mancha de ruptura das Barragens B2A e B2 foi definido a partir da sobrelevação da onda de ruptura sobre a cheia natural inferior a 2 pés (0,61 m), onde não se observa mais impactos incrementais da onda de ruptura. Para o dia chuvoso o critério foi atingido a 20 km a partir da Barragem B2. Para o dia seco, em

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

função da deposição completa da massa mobilizada na calha do Rio das Velhas, o critério de parada se limitou a 12 km.

A mancha de inundação para o cenário de maior dano possui extensão total de 24 km, onde a ZAS possui uma extensão de 13 km (30 minutos de propagação), e a ZSS os demais 11 km. Há diversas regiões e infraestruturas impactadas no trecho de jusante da barragem, como residências, escolas, estradas, hospital, entre outras. Segundo informações fornecidas pela Minérios Nacional, no âmbito do PAEBM, um resumo dos potenciais impactos é apresentado abaixo:

Em relação a área atingida, a Minérios Nacional relata em seu documento de PAEBM<sup>1</sup> (Doc. 14):

- Os 2 sítios que se encontravam na região de ZAS foram evacuados.
- A empresa Fontes realizou em 2020 um cadastro parcial da região das ZSS no qual visitadas 44 propriedades, totalizando 74 pontos e 126 moradores. Dentre eles, foram identificados um total de 18 moradores com mobilidade reduzida (recém-nascido, criança, idoso, grávidas, deficientes físicos e intelectuais).
- Na área de estudo compreendida pela mancha nota-se a existência de infraestruturas de mobilidade tais como ferrovias, e rodovias municipais, incluindo a MG-030 (estrada real).
- Não existem presídios, subestações de energia, estações de tratamento de água ou de esgoto atingidas pela mancha;
- A região que sofrerá impacto direto, no caso de um rompimento das barragens pertencentes ao Complexo de Fernandinho, é conhecida como “Fazenda Velha”, que se trata de um talvegue com curso d’água que recebe o nome de Córrego Fazenda Velha.
- Foram identificados postos combustíveis na região afetada pela mancha, sendo eles: Posto Petrobras (Carmyanas); Posto Mac Preto (Posto da Jannete).

---

<sup>1</sup> A responsabilidade pelo mapeamento e fornecimento das informações relacionadas aos potenciais impactos é estritamente da Minérios Nacional, não fazendo parte do escopo do presente estudo.



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

- No caso de uma ruptura hipotética das barragens B2A e B2 não foi identificado nenhum sítio arqueológico na região da mancha. Na região de Rio Acima/MG existe o sítio arqueológico Vale da Mata, no entanto localiza-se externo a área afetada.
- Encontram-se na região da mancha (ZSS): a Prefeitura Municipal de Rio Acima, a Igreja São Judas Tadeu, a Paróquia Santo Antônio, a Estação de Trem de Rio Acima e o Terminal Rodoviário.
- Não foram identificados na região da mancha sítios espeleológicos;
- Não foram identificados na região da mancha povoados de comunidades indígenas ou quilombolas;
- Baseado em visitas in loco e em base de dados geoespaciais foi identificado que as barragens do Complexo de Fernandinho estão inseridas no bioma Mata Atlântica e a sua jusante, nota-se uma área preservada e de interesse ambiental (APA Estadual Sul RMBH).

A mancha em estudo não causará impactos diretos na captação de água para a cidade de Rio Acima, no entanto, o córrego Fazenda Velha e o Rio das Velhas sofreriam impacto direto, causando em partes assoreamento destes cursos hídricos e impacto na qualidade da água.

A Tabela 8.1 apresenta um resumo geral das premissas e resultados do Estudo de Ruptura Hipotética das Barragens B2 e B2A (cascata), para os cenários de ruptura propriamente ditos em dia chuvoso (extremo) e dia seco (provável).

 	TÍTULO		Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A		CSN-F3-RL-003-02
			Nº CSN Mineração
			MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Tabela 8.1 – Resumo das premissas do estudo para os cenários de ruptura propriamente dito, em dia chuvoso e seco, respectivamente.

Premissas/Cenários	Cenário de Dia Chuvoso (Extremo)	Cenário de Dia Seco (Provável)
Volume Total dos Maciços e Rejeitos das Barragens B2 e B2A (milhões de m³)	7,96	7,96
Volume Saturado dos Maciços e Rejeitos – Abaixo do NA (milhões de m³)	4,95	3,88
Volume Não Saturado dos Maciços e Rejeitos – Acima do NA (milhões de m³)	3,01	4,07
Volume de Água Livre nos Reservatórios (milhões de m³)	0,93	0,00
Concentração Volumétrica (CV) estimada	54%	67%
Volume mobilizado	100% - Maciço e reservatório Ruptura conjugada da B2 e B2A	
Modo de Falha	Instabilização do maciço e liquefação dos rejeitos do reservatório	
Formação da Brecha	Instantânea, totalidade do maciço e reservatório até a cota do terreno	
Condições Hidrológicas	Duração crítica de 5 dias nos reservatórios e TR 100 anos no vale de jusante	Sem vazões
Modelo Numérico 2D	RiverFlow2D® Módulo de Rejeito e Detritos (MT) Parâmetros reológicos variáveis	
Concentração Volumétrica (CV) adotada	50%	55%
Trecho propagado (km)	24,2	24,2
Barragem em Cascata	Barragem Ecológica I	
Trecho do critério de parada (km)	24,2	11,9
Área da mancha (m²)	3.854.270	1.948.388
ZAS (Km)	13	
ZSS (Km)	11	

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## 8.2 Cenários de Simulação

Para uma melhor abrangência do mapeamento do risco potencial de inundação, optou-se por trabalhar com cenários distintos, que seguem apresentados. Detalhes dos cenários serão apresentados ao longo do relatório.

- **A1 - Cenários sem ruptura:** Em função da ausência de vertimento da Barragem B2A (frente à elevada retenção do escoamento) e da pequena vazão vertida da Barragem B2, além da baixa vazão de cheia regionalizada e a não ocupação do vale do Córrego Fazenda Velha, do esforço computacional para representar um escoamento que não sairá da calha e não terá nenhum incremento aos cenários considerados, este cenário não se justifica de ser simulado e apresentado no presente relatório. Vale ressaltar que as vazões de cheias foram consideradas no Rio das Velhas, somente para a propagação do hidrograma dos cenários de ruptura, devido à sua possibilidade de influência nos cenários com ruptura e nas manchas de inundação. Assim, não há impactos dos vertimentos para jusante das barragens. Mais detalhes são apresentados ao longo do relatório.
- **A2 – Cenários de ruptura propriamente dita:**
  - c) **Ruptura em dia chuvoso (extremo):** Considerando a maior elevação da linha freática nos maciços e reservatórios das Barragens B2 e B2A, aliado a uma cheia crítica na bacia (precipitações intensas), caracterizando como o cenário de maior dano;
  - d) **Ruptura em dia seco (provável):** Considerando a maior elevação da linha freática nos maciços e reservatórios das Barragens B2 e B2A, em um dia de operação comum, sem precipitações;

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## 8.3 Estudos Hidrológicos

Os estudos hidrológicos foram utilizados com a finalidade de: (i – Item 8.3.1) caracterizar as vazões de cheia no reservatório e barragem, com a finalidade de suporte aos cenários de simulação; (ii – Item 8.3.2) caracterização da vazão de base nos cursos de água de jusante frente aos cenários de simulação avaliados, permitindo também comparar a inundação proveniente da ruptura com as cheias naturais do vale de jusante.

As premissas do respectivo estudo foram subsidiadas pelos estudos hidrológicos, divididos em 2 partes principais (8.3.1 Área de Contribuição da Barragem e 8.3.2 Área de Jusante), e sintetizados a seguir:

### 8.3.1 Área de Contribuição da Barragem

Os estudos hidrológicos na região da área de influência da barragem (Doc. 1) foram elaborados pela Hidrológica Soluções.

Segundo o Doc. 1, foi selecionada a estação Rio do Peixe (2043004), considerando que a estação fica mais próxima do complexo Fernandinho, ao qual registrou o maior evento de precipitação (223,5 mm), além de ter apresentado a maior série de valores máximos diários anuais (72 anos), que superam os 20 anos de dados. A Figura 8.2 apresenta a localização das estações pluviométricas na região.

	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	Nº Brazil Hydro
		CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

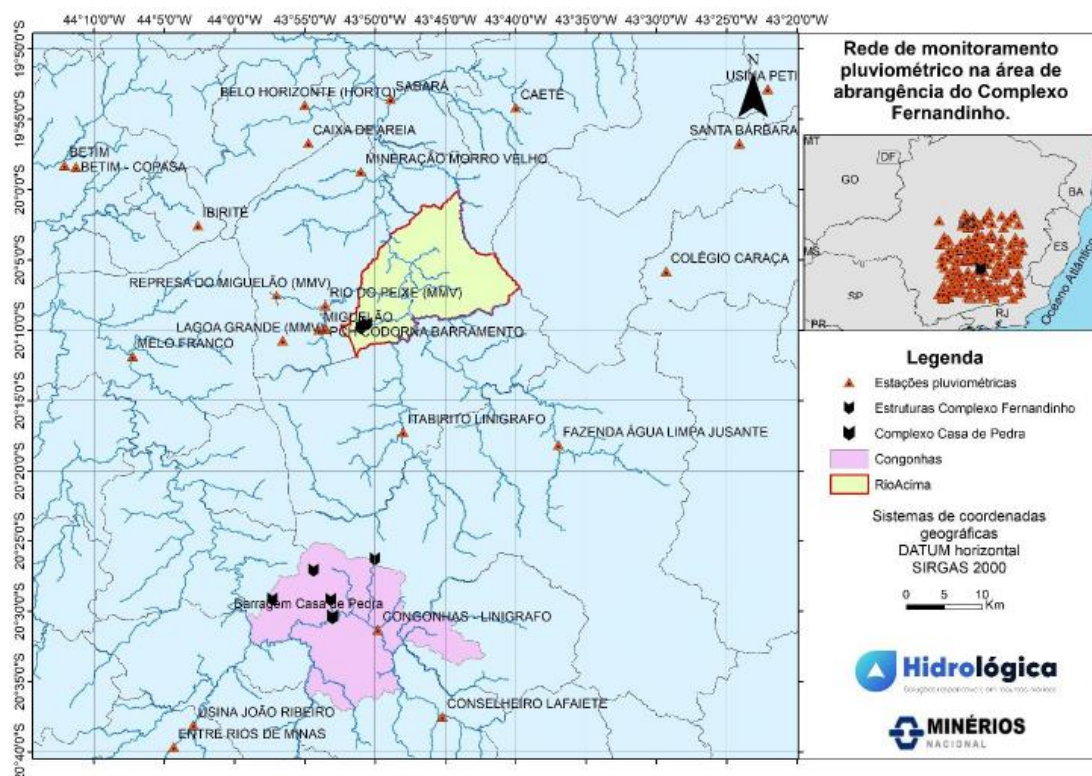


Figura 8.2 - Rede de monitoramento pluviométrico identificado na área de abrangência e no entorno do Complexo Fernandinho da Minérios Nacional (CSN) (Doc. 1).

Segundo o Doc. 1, foi realizada a análise de consistência dos dados, além dos ajustes dos dados sub diários. A hipótese de estacionariedade, homogeneidade, aleatoriedade e independência dos dados foram testadas por diferentes metodologias, empregando-se o *software* ALEA. Foi adotada a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV). Foi convertido os quantis de chuva de 1 dia para 24 horas, e discretizadas as chuvas em durações inferiores. A partir da análise estatística (frequência) das precipitações, foram elaboradas as relações IDF para diversos períodos de retorno.

Segundo o Doc. 1, para o cálculo da PMP, utilizando-se do método estatístico de Hershfield (1961), conforme metodologia reconhecida pela World Meteorological Organization (WMO), foi realizada a análise estatística das precipitações de 198 estações pluviométricas investigadas na região central de Minas Gerais, com no mínimo 30 anos de dados, permitindo obter os resultados das precipitações máximas prováveis em diversas regiões.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

A Tabela 8.2 apresenta os quantis obtidos para o TR decamilenar e PMP, sendo o TR decamilenar definido como mais restritivo, por seus valores superiores ao da PMP (Doc. 1).

Tabela 8.2 – Quantis de chuva para diferentes tempos de retorno e Precipitação Máxima Provável – PMP (Doc. 1).

Duração		Quantis (mm)	
		10.000	PMP
minutos	5 min	59,5	53,9
	10 min	94,4	85,7
	20 min	141,7	128,5
	30 min	174,9	158,7
	40 min	209,3	189,9
	50 min	229,8	208,5
horas	1 h	236,3	214,4
	2 h	285,7	259,2
	3 h	311,2	282,4
	4 h	327,9	297,5
	6 h	348,1	315,9
	8 h	364,7	330,9
	10 h	378,4	343,3
	12 h	384,8	349,1
	18 h	413,2	374,9
	24 h	418,3	379,5
	48 h	482,6	497,5
	72 h	562,5	542,1
dias	5 d	713,3	630,2
	7 d	740,2	691,6
	10 d	890,1	815,5
	30 d	1.452,6	1.253,3

Segundo Doc.1, para o cálculo do trânsito de cheias nas estruturas, foram obtidas as atuais áreas de contribuição das bacias, que são: Barragem B2 Auxiliar de 1,91 km<sup>2</sup>; Barragem B2 de 0,20 km<sup>2</sup>, conforme apresentado nas Figuras 8.3 e 8.4.



	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	Nº Brazil Hydro
		CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

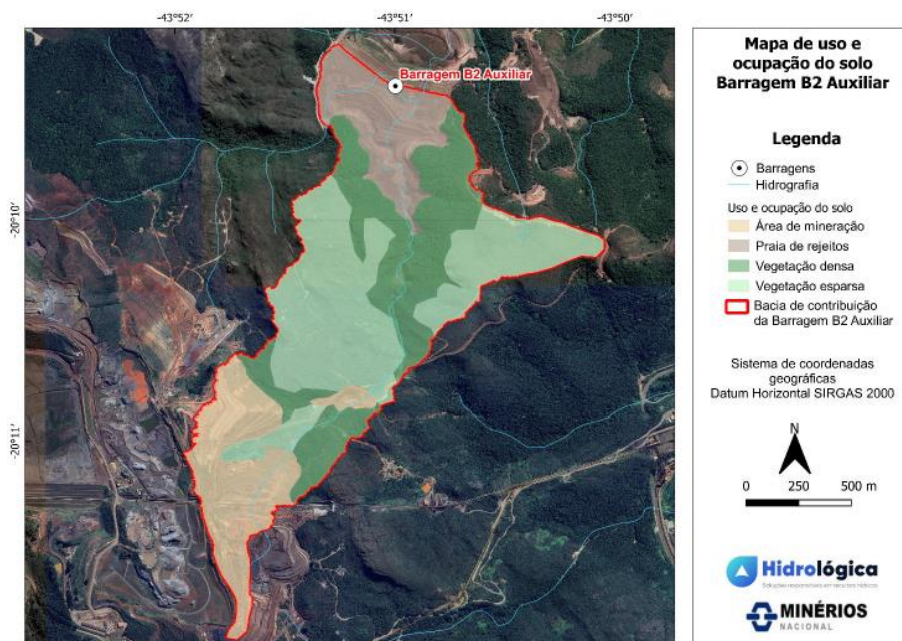


Figura 8.3 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia de contribuição da B2A (Doc. 1).



Figura 8.4 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia de contribuição da B2 (Doc. 1).

Adicionalmente foram obtidos os parâmetros físicos da bacia (tempo e concentração, *lag time*), além dos parâmetros de uso e ocupação do solo nas bacias. O respectivo trânsito de cheia foi avaliado para as estruturas, utilizando-se do software HEC-HMS, e dos respectivos parâmetros físicos das áreas de contribuição, além da relação cota-volume dos reservatórios, e as respectivas curvas de descarga das

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

estruturas. Os resultados do trânsito de cheia para as estruturas das Barragens B2A e B2 são apresentados nas seguintes tabelas e figuras.

Tabela 8.3 - Avaliação de Segurança frente a Cheia - Resultado das simulações – TR 10.000 anos – Barragem B2A (Doc. 1).

Duração (min/hora/dia)	Vazão Afluente (m³/s)	Vazão Defluente (m³/s)	Elevação (m)
20 min	108,30	22,53	932,66
30 min	126,86	33,14	932,83
50 min	148,51	48,86	933,05
1 hora	140,68	47,94	933,04
2 horas	<b>120,04</b>	<b>49,49</b>	<b>933,06</b>
3 horas	102,11	46,77	933,02
4 horas	88,84	43,44	932,98
6 horas	70,13	37,24	932,89
8 horas	54,92	38,17	932,91
10 horas	46,65	34,17	932,85
12 horas	40,11	30,46	932,79
18 horas	38,02	27,93	932,75
24 horas	29,56	22,60	932,66
48 horas	15,09	13,48	932,48
72 horas	11,89	10,94	932,41
5 dias	9,17	8,67	932,35
7 dias	6,82	6,51	932,29
10 dias	5,77	5,57	932,26
30 dias	3,17	3,12	932,16

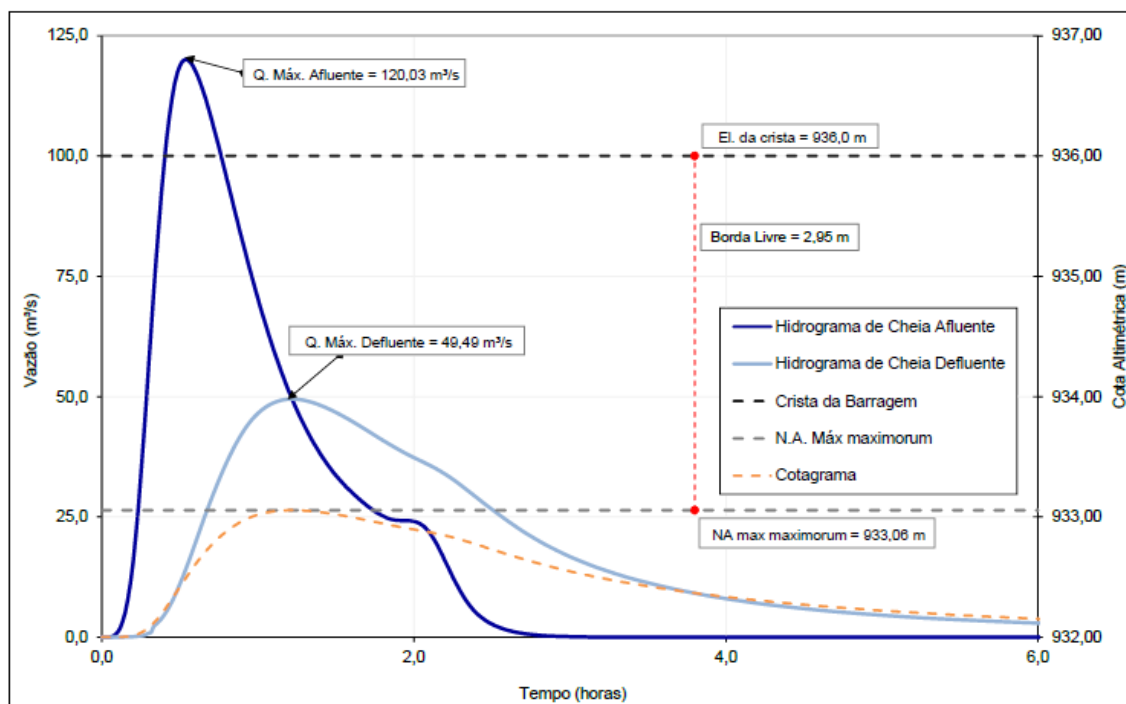


Figura 8.5 - Trânsito da cheia associada ao TR de 10.000 anos – Barragem B2A (Doc. 1).

 	TÍTULO		Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A		CSN-F3-RL-003-02
			Nº CSN Mineração
			MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Tabela 8.4 - Avaliação de Segurança frente a Cheia - Resultado das simulações – TR  
10.000 anos – Barragem B2A – 2 horas (Doc. 1).

Variável	TR 10.000 anos
Duração crítica	2 horas
Altura da chuva crítica (mm)	285,70
Vazão Máxima Afluente (m³/s)	120,03
Vazão Máxima Defluente (m³/s)	49,49
Elevação da Crista (m)	936,00
Elevação da Soleira (m)	932,00
Borda Livre Normal (m)	4,00
N.A. máx. <i>maximorum</i> (m)	933,06
Borda Livre Calculada (m)	2,95

Tabela 8.5 - Avaliação de Segurança frente a Cheia - Resultado das simulações – TR  
10.000 anos – Barragem B2 (Doc. 1).

Duração (min/hora/dia)	Vazão Afluente (m³/s)	Vazão Defluente (m³/s)	Elevação (m)
20 min	27,04	25,19	900,54
30 min	28,23	26,67	900,60
50 min	28,77	27,47	900,62
1 hora	26,15	25,18	900,54
2 horas	19,32	19,07	900,31
3 horas	15,18	15,06	900,14
4 horas	12,49	12,42	900,01
6 horas	9,19	9,17	899,84
8 horas	6,34	6,33	899,67
10 horas	5,31	5,30	899,60
12 horas	4,52	4,51	899,54
18 horas	4,33	4,32	899,53
24 horas	3,31	3,30	899,44
48 horas	1,62	1,62	899,28
72 horas	1,27	1,27	899,24
5 dias	0,97	0,97	899,20
7 dias	0,72	0,72	899,16
10 dias	0,61	0,61	899,14
30 dias	0,33	0,33	899,10

	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	Nº Brazil Hydro
		CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

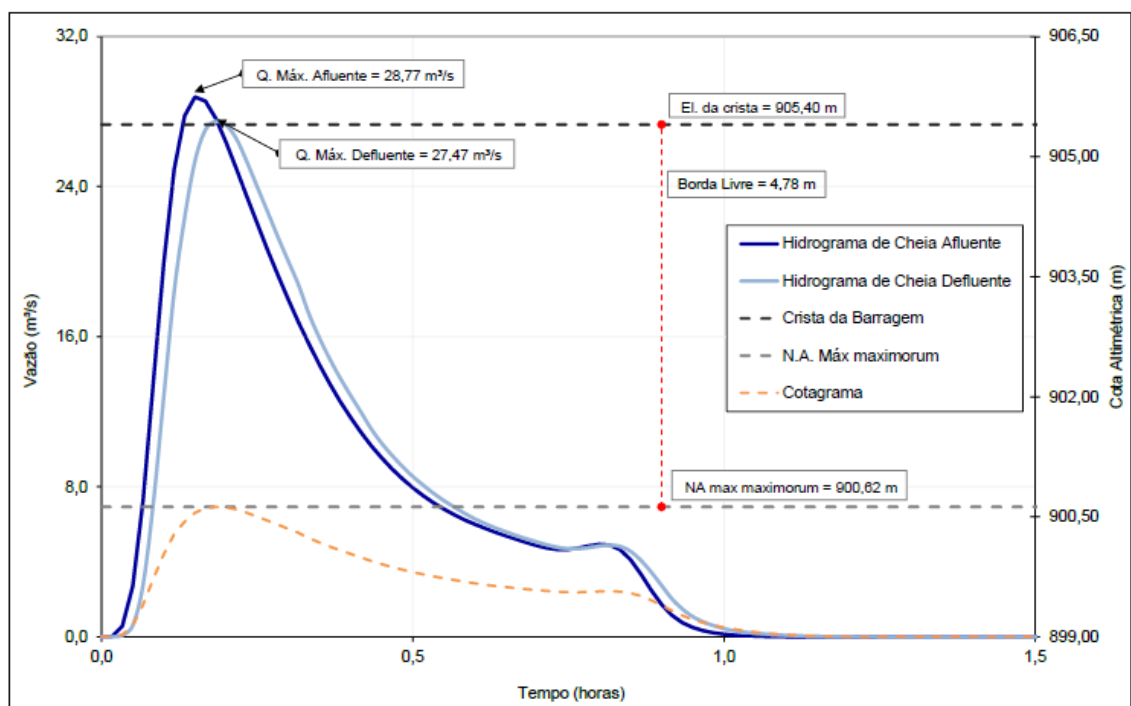


Figura 8.6 - Trânsito da cheia associada ao TR de 10.000 anos – Barragem B2 (Doc. 1).

Tabela 8.6 - Avaliação de Segurança frente a Cheia - Resultado das simulações – TR 10.000 anos – Barragem B2 (Doc. 1).

Variável	TR 10.000 anos
Duração crítica	50 minutos
Altura da chuva crítica (mm)	229,80
Vazão Máxima Afluente (m³/s)	28,77
Vazão Máxima Defluente (m³/s)	27,47
Elevação da Crista (m)	905,40
Elevação da Soleira (m)	899,00
Borda Livre Normal (m)	6,40
N.A. máx. <i>maximorum</i> (m)	900,62
Borda Livre Calculada (m)	4,78

Além dos reportes de resultados anteriormente mencionados, os valores de volume afluente para diversas durações foram utilizados conforme descrito no cenário de dia chuvoso (extremo) do Item 8.4.2.



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

### 8.3.2 Área de Jusante

Os estudos hidrológicos regionais para caracterização das vazões de cheia na bacia (Doc. 3) foram elaborados pela Fontes Geotécnica.

Segundo o Doc. 3, foi selecionada a estação fluviométrica de Honório Bicalho (41199998), operada pela Agência Nacional de Águas (ANA), no próprio Rio das Velhas, na região de Rio Acima, um pouco a jusante do ponto estudado, por esta ser representativa da região, e possuir mais de 20 anos de dados. A Figura 8.7 apresenta a localização da estação.



Figura 8.7 - Estação Fluviométrica utilizada na regionalização das vazões de jusante (Doc.3).

Segundo o Doc. 3, com base nos máximos anuais da referida estação, foi realizada uma análise de frequência de máximos, ajustadas por diversas funções probabilísticas (Figura 8.8), sendo a distribuição de *Gumbel* de melhor representatividade e escolhida para a regionalização, segundo o estudo. A Tabela 8.7 apresenta os resultados de vazões frente à análise de frequência para a Estação Honório Bicalho.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

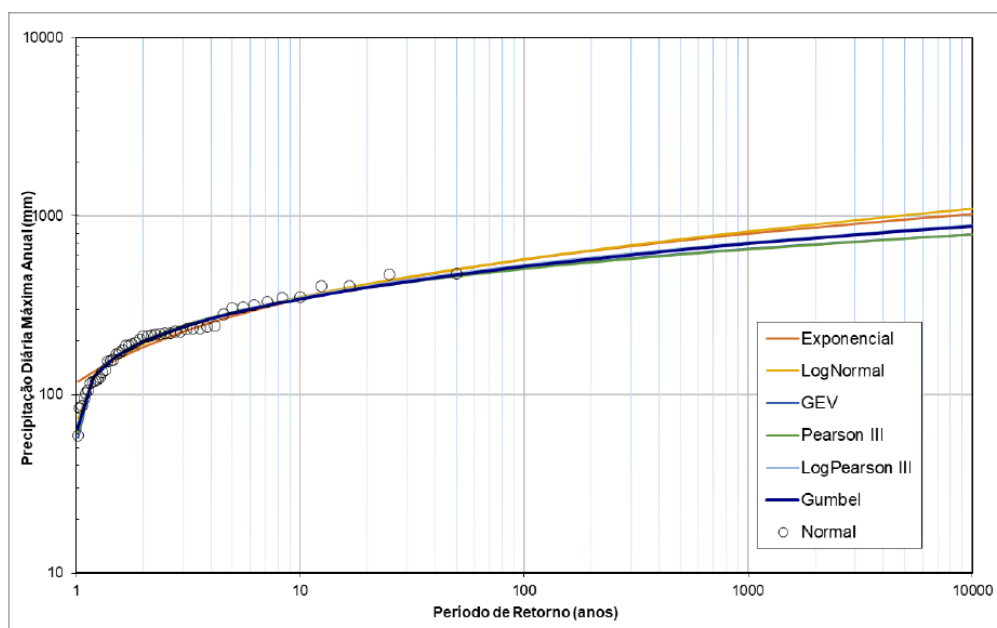


Figura 8.8 – Análise de frequência de vazões máximas para a Estação Honório Bicalho (Doc.3).

Tabela 8.7 – Resultados de vazões para a análise de frequência de vazões máximas da Estação Honório Bicalho (Doc. 3).

Distribuição Log-Pearson			
TR	Vazão (m³/s)	TR	Vazão (m³/s)
1,02	73,79	15	390,11
1,5	158,15	20	417,22
2	198,24	25	438,38
5	286,64	30	455,76
7	318,56	50	505,08
10	352,07	100	523,13

Segundo o Doc. 3, em vista da proximidade da estação com o início do modelo numérico no Rio das Velhas, pode-se utilizar o próprio valor das vazões de cheia de TR 100 anos (523 m³/s) da Estação Honório Bicalho como vazão de base na modelagem numérica.

Segundo o Doc. 3, para o Córrego Fazenda Velha, afluente do Rio das Velhas, foi necessário calcular a vazão de cheia, utilizando-se da regionalização por área de drenagem. A Figura 8.9 apresenta o mapa de bacias regionais, incluídos a Estação Honório Bicalho e o Córrego Fazenda Velha.



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

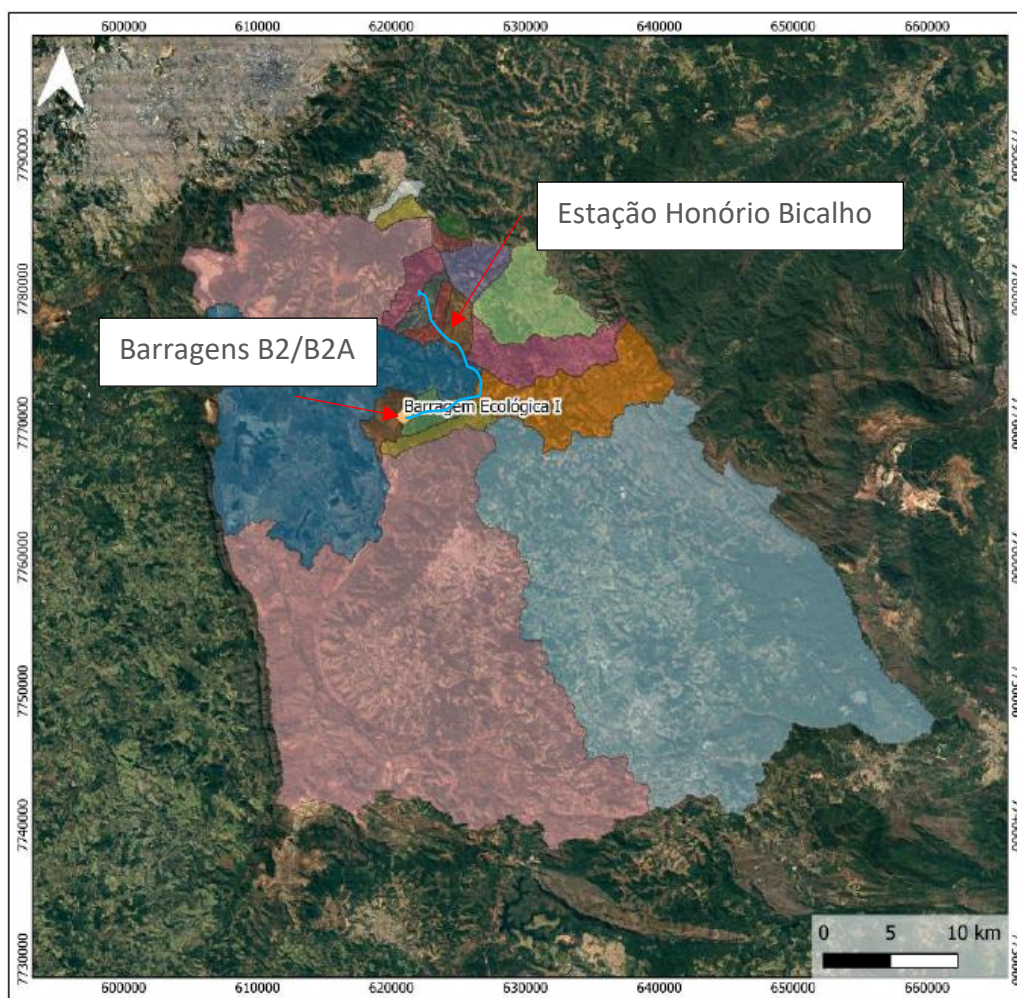


Figura 8.9 – Áreas de drenagem para a regionalização hidrológica (Doc.3).

Segundo o Doc. 3, a regionalização por área de drenagem resulta nas seguintes vazões de TR 100 anos:

- 2,39 m<sup>3</sup>/s para o eixo da Barragem Ecológica 1, a jusante das Barragens B2 e B2A (Área de drenagem de 7,07 km<sup>2</sup>);
- 3,91 m<sup>3</sup>/s para a área incremental do Córrego Fazenda Velha, entre a Barragem Ecológica 1 e a confluência com o Rio das Velhas (Área de drenagem de 11,57 km<sup>2</sup>).

Os valores resultantes das vazões de TR 100 anos para o Córrego Fazenda Velha são muito baixos, e não apresentam potencial de inundação algum no Córrego Fazenda Velha, que conta ainda com uma região inabitada e trechos de vale muito encaixados, sem a presença de qualquer infraestrutura.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Essas mesmas vazões são insignificantes perante as dezenas de milhares de m<sup>3</sup> reportados nos hidrogramas de ruptura das Barragens B2 e B2A, as quais, não foram inseridas como vazão de base no Córrego Fazenda Velha nos cenários de ruptura, conforme descrição apresentada nos próximos itens.

## 8.4 Hidrograma de Ruptura

O hidrograma de ruptura hipotética representa uma distribuição do volume de massa mobilizado no tempo, composto das parcelas do volume do maciço juntamente ao volume do reservatório. A definição do hidrograma de ruptura hipotética se baseia nas características da barragem, onde são definidas hipóteses de ruptura do maciço, avaliando-se como uma brecha pode se desenvolver e evoluir na barragem. Com as características do reservatório, pode-se estimar o volume mobilizado, e o suporte por modelagem numérica computacional auxilia na estimativa do hidrograma de ruptura resultante da barragem.

### *Hipótese de ruptura e modo de falha*

Para a correta definição das hipóteses de ruptura e escolha do método de falha para barragens de rejeito, é necessário um conhecimento sobre as estruturas do barramento, assim como da composição e da disposição dos rejeitos em seu reservatório. A definição de cenários de ruptura, principalmente o de maior dano, não deve levar em consideração a sua probabilidade de ocorrência, e sim, que o evento pode ocorrer independentemente dos riscos avaliados, sempre respaldados por julgamentos de engenharia que tragam uma representação plausível de tal fenômeno.

Com base na análise e citações dos Docs. 1, 2, 3 e 7, apresentam-se a seguir as considerações sobre os modos de falha avaliados:

Galgamento (*Overtopping*): O cenário de galgamento das Barragens B2 e B2A foi descartado em função da segurança hidráulica das estruturas de vertimento frente as condições hidrológicas extremas afluentes no reservatório e seu respectivo trânsito de cheia, resultando em bordas livres consideráveis. Assim, o risco de galgamento foi descartado dos cenários plausíveis.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Liquefação: Os rejeitos armazenados nas Barragens B2 e B2A são susceptíveis à liquefação, e as análises de estabilidade corroboram com a possibilidade de tal fenômeno ocorrer.

Cisalhamento/Instabilidade: Os resultados do estudo de estabilidade realizado para B2A indica que os fatores de segurança encontrados em algumas seções não estão adequados conforme a NBR 13028 (ABNT, 2017) para condições estáticas não drenada, pseudoestáticas, atingindo níveis não satisfatórios e indicando condições desfavoráveis de estabilidade do maciço. Para a Barragem B2, indica que os fatores de segurança obtidos nas análises no cenário de condição não drenada de pico e liquefeita são superiores ao mínimo preconizado, sendo por tanto, estável para condições de liquefação. Dessa forma, pode-se considerar que o modo de falha instabilização é factível.

Erosão Interna/Tubular (Piping): Não há surgências ou elevação da linha freática que possam sinalizar um potencial risco de erosão interna da estrutura. Mesmo que ainda haja possibilidade de tal ocorrência, a abertura de brecha por uma erosão interna no maciço ocorreria de maneira gradual e se desenvolveria em um intervalo de tempo superior à instabilização, não resultando em um cenário potencial de maior dano.

A partir das justificativas apresentadas, entende-se que a combinação dos cenários de **instabilização do maciço e liquefação dos rejeitos** é um cenário passível de causar um maior dano a jusante e será considerado na avaliação do hidrograma de ruptura. Em vista da integração física entre o reservatório da barragem B2 e o maciço da barragem B2A, será considerado a **ruptura conjunta das barragens**.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

#### 8.4.1 Caracterização do Reservatório

Com o objetivo de se definir o cenário mais crítico de ruptura e mobilização dos volumes, é necessário um conhecimento sobre a caracterização e deposição dos rejeitos ao longo do tempo e espaço, além de se conhecer a geometria primitiva e caracterização topográfica atual do reservatório.

Os dados topográficos disponibilizados abrangem toda a região da barragem e são apresentados a seguir:

- Base topográfica em curvas de níveis equidistantes de metro em metro proveniente de um perfilamento a laser (Lidar) de elevada precisão (acurácia média vertical de 0,10 m e horizontal de 0,15 m, e PEC 0,27) por meio de aeronave, realizado pela AEROSAT em agosto de 2022 (Doc. 10) - Datum Sirgas 2000, UTM Zona 23 Sul (processados a um arquivo *Raster* de 1,0 x 1,0 m).
- **Em vista das barragens não acumularem água, não foi possível executar e obter o levantamento batimétrico do reservatório, e a base topográfica acima mencionada já apresenta a caracterização por completa dos reservatórios das estruturas.**

**Os dados topográficos são de elevada resolução espacial, possuem detalhamento para uma boa representatividade da mancha de inundação, e atendem com êxito as especificações do TR ERHB FEAM.**

A Figura 8.10 abaixo apresenta uma vista geral do reservatório, onde é possível observar o levantamento altimétrico das Barragens B2 e B2A.



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2



Figura 8.10 – Levantamento altimétrico (curvas de 1m) do reservatório (Doc. 11), sobreposto à imagem atualizada das Barragens B2 e B2A (Ago/2023).

A geometria primitiva do reservatório, que é caracterizada por uma elevada declividade (4%) aliado a uma elevada altura de deposição dos rejeitos, favorece a mobilização dos rejeitos em uma eventual ruptura. A Figura 8.11 apresenta uma vista 3D do reservatório, e a Figura 8.12 um perfil longitudinal, com base na composição topográfica realizada a partir dos arquivos da primitiva (Doc. 12) e topografia atual e (Doc. 11). O volume total (100%) dos maciços e rejeitos das Barragens B2 e B2A é estimado em 7.960.826,0 m<sup>3</sup>.

A caracterização reológica do rejeito é apresentada no Item 7.5. Já os parâmetros e aspectos reológicos do rejeito utilizados na modelagem numérica são apresentados no Item 8.5.6.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

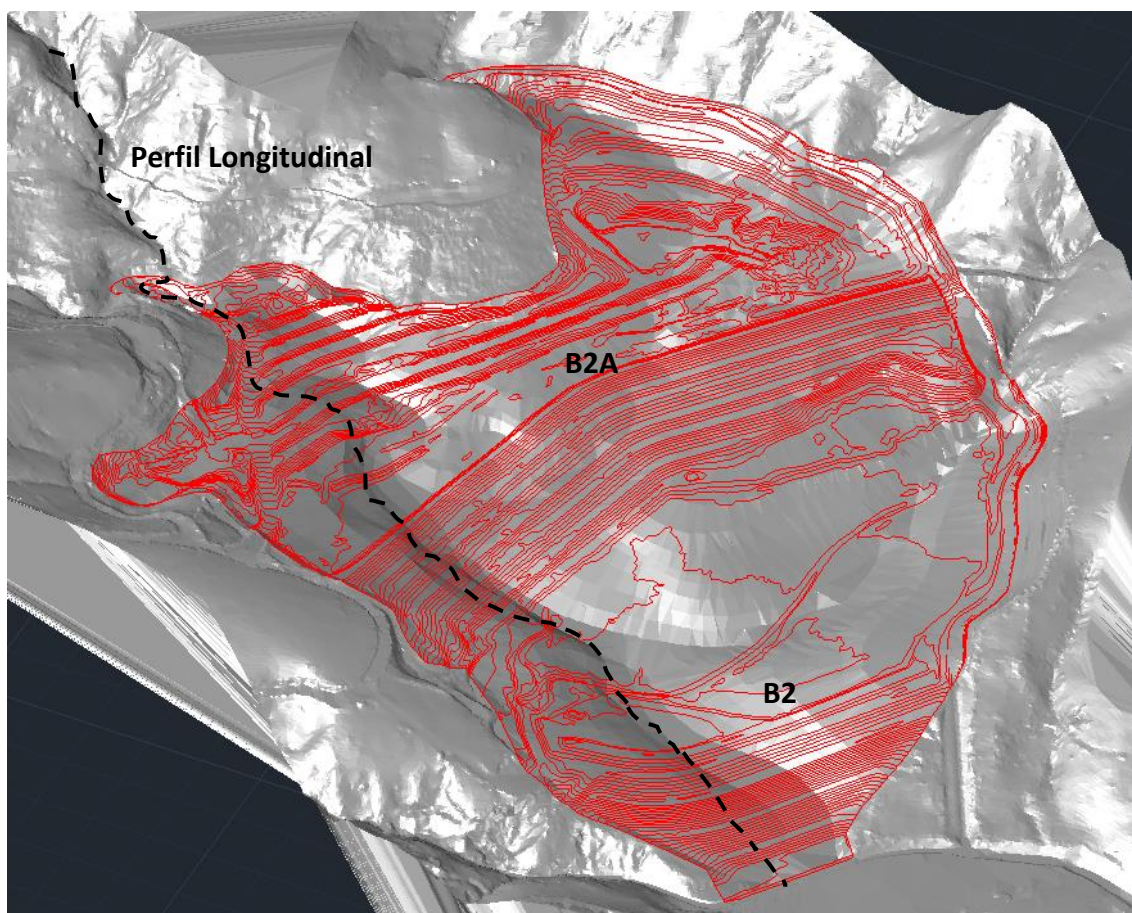


Figura 8.11 – Vista 3D das Barragens B2 e B2A, incluindo a topografia atual e primitiva

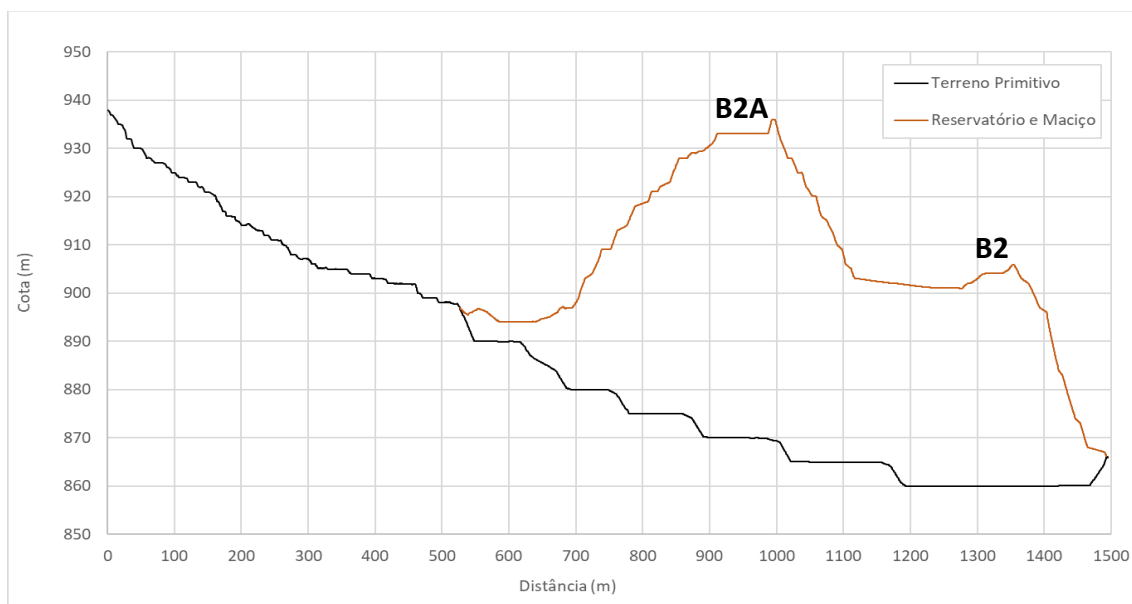


Figura 8.12 – Perfil longitudinal do reservatório, incluindo a topografia atual e primitiva



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

#### 8.4.2 Volume Mobilizado

Apesar da deposição dos rejeitos no interior do reservatório parecer estável e aparentemente secos nas camadas mais superficiais, uma ruptura do maciço instantânea por instabilização poderia ser um gatilho para liquefação das porções mais inferiores do rejeito (saturado), resultando em um material com característica fluida, com possibilidade de escoamento para jusante. Frente à elevada declividade da primitiva no interior do reservatório e as incertezas associadas do rejeito em profundidade, **foi considerado a possibilidade de mobilização de 100% do volume total dos maciços e dos rejeitos dos reservatórios.**

Para modelagem do hidrograma de ruptura, em vista do cenário de maior dano se caracterizar pela instabilização e consequente liquefação dos rejeitos, foi realizada a **movimentação instantânea tanto do maciço quanto do reservatório (brecha desenvolvida até os limites do terreno natural, com abertura no tempo “zero”)**, a partir da utilização da geometria da configuração atual do terreno sobre a geometria primitiva do terreno no interior do reservatório, como pode ser observado na Figura 8.13. Para fins de se obter um melhor resultado do hidrograma de ruptura e propagação da massa a jusante, utilizou-se de um único modelo abrangendo juntamente a área do volume a ser mobilizado (ruptura) e a área a jusante (propagação). A modelagem utilizou como base o *software* RiverFlow2D, com a utilização de escoamento hiperconcentrado, conforme descrição apresentada no Item 8.5.

A determinação de tais premissas resulta na construção do hidrograma de ruptura mais crítico possível, com picos de vazões mais elevados e, a concentração de um hidrograma de maior pico favorece uma condição de maior segurança na análise, na medida em que se proporciona a obtenção de resultados de inundação mais críticos na propagação da onda de inundação. Essa modelagem também favorece a observação mais realística da dinâmica de movimentação da massa, uma vez que a mesma pode ficar retida no interior do reservatório, e efeitos hidráulicos podem impactar na sua propagação e mobilidade.



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

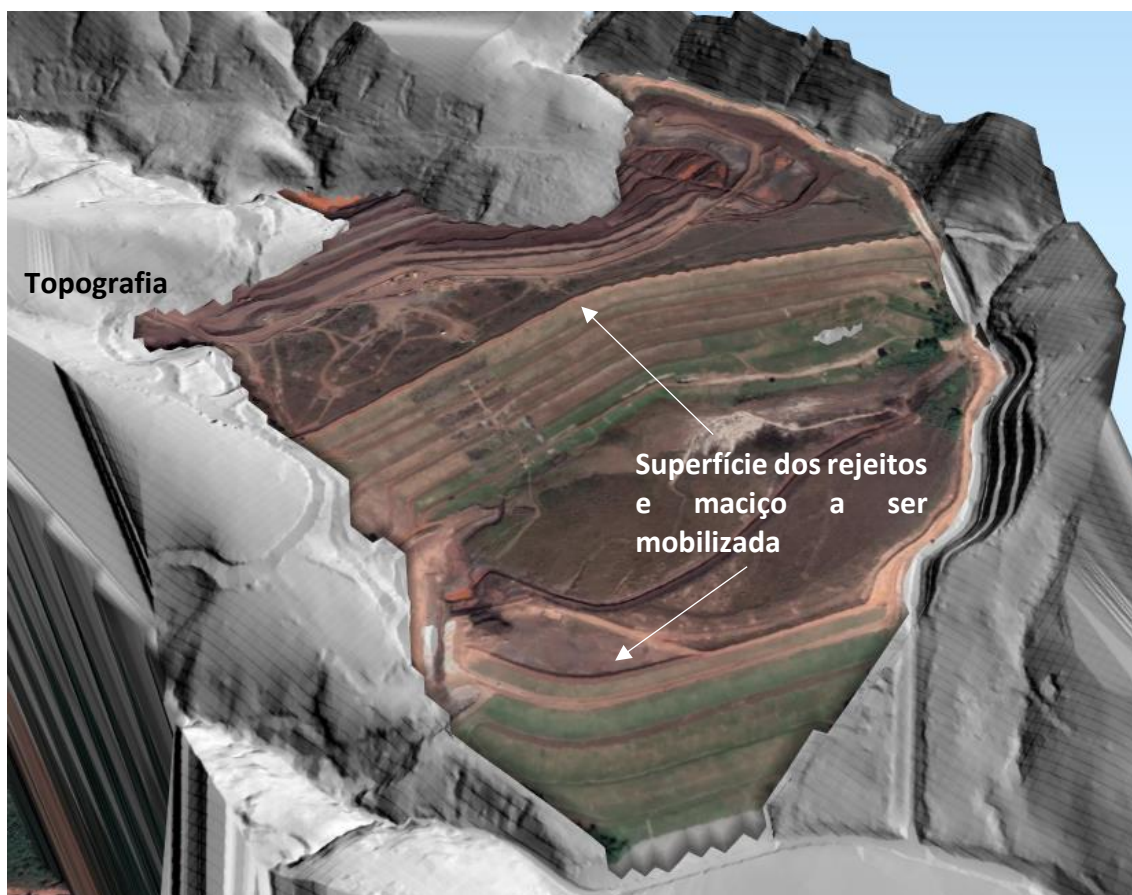


Figura 8.13– Perspectiva 3D da ruptura (maciço e reservatório).

Para uma melhor abrangência do mapeamento do risco potencial de inundação, optou-se por trabalhar com dois cenários distintos, que seguem apresentados:

- A1 - Cenários sem ruptura:** Em função da ausência de vertimento da Barragem B2A (frente à elevada retenção do escoamento) e da pequena vazão vertida da Barragem B2, além da baixa vazão de cheia regionalizada e a não ocupação do vale do Córrego Fazenda Velha, do esforço computacional para representar um escoamento que não sairá da calha e não terá nenhum incremento aos cenários considerados, este cenário não se justifica de ser simulado e apresentado no presente relatório. Vale ressaltar que as vazões de cheias foram consideradas no Rio das Velhas, somente para a propagação do hidrograma dos cenários de ruptura, devido à sua possibilidade de influência nos cenários com ruptura e nas manchas de inundação. Assim, não há impactos dos vertimentos para jusante das barragens.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

- **A2 – Cenários de ruptura propriamente dita:**

- e) **Ruptura em dia chuvoso (extremo):** Considerando a maior elevação da linha freática nos maciços e reservatórios das Barragens B2 e B2A, aliado a uma cheia crítica na bacia (precipitações intensas), caracterizando como o cenário de maior dano;
- f) **Ruptura em dia seco (provável):** Considerando a maior elevação da linha freática nos maciços e reservatórios das Barragens B2 e B2A, em um dia de operação comum, sem precipitações;

Para o cenário de **dia chuvoso (extremo)**, utilizou-se dos níveis máximos reportados nos instrumentos das Tabelas 7.3 e 7.4, juntamente a uma cheia ordinária afluente ao reservatório. Com o avanço das obras para elevação dos fatores de estabilidade da Barragem B2A, o volume disponível para trânsito de cheia aumentou, resultando em aproximados 2,48 milhões de m<sup>3</sup> até a soleira do vertedouro lateral, El. 932,00 m, e 3,47 milhões de m<sup>3</sup> até a crista da barragem, El. 936,00 m. Para continuidade das obras sem acumulação de água, foi implantado um sistema de bombeamento composto por 3 bombas de capacidade unitária de aproximadamente 1.000 m<sup>3</sup>/h, que tem como função manter o reservatório sem água, desviando as contribuições da bacia de montante, as quais não são direcionadas pelo canal de cintura. A Figura 7.4 apresenta uma vista esquemática do reservatório da barragem B2A.

Como premissa desse cenário, o estudo hidrológico apresentado no Item 8.3 serviu somente para o dimensionamento do vertedouro, porém as condições reais do reservatório (seco), não são plausíveis e reais de serem utilizadas no estudo de ruptura da barragem. Assim, foi assumido o reservatório como seco, conforme recomendações e objetivos dos Planos de Chuva (Doc. 9) da própria Minérios Nacional, sendo esta premissa validada entre a Minérios Nacional, a projetista, o Engenheiro de Registro, e aceito pela Agência Nacional de Mineração (ANM).

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

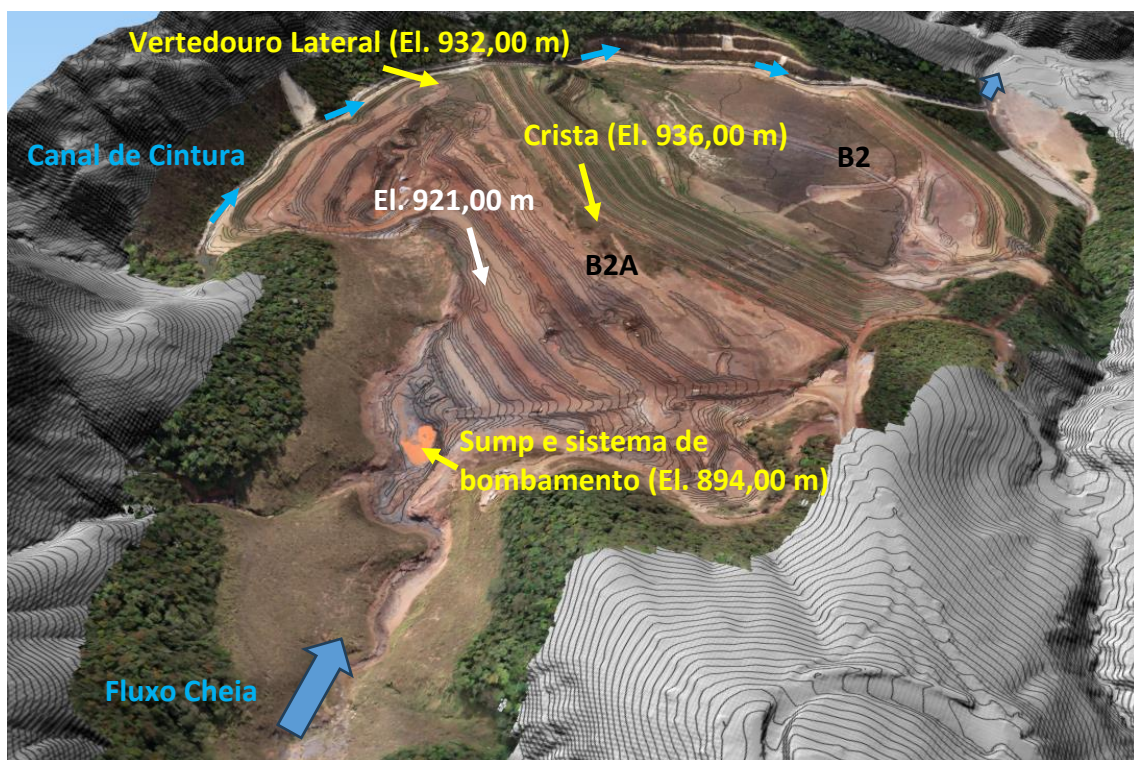


Figura 8.14 – Perspectiva 3D da ruptura (maciço e reservatório).

Utilizando-se do sistema de bombeamento em capacidade plena, das premissas anteriormente elencadas, e dos volumes afluentes das cheias conforme estudo hidrológico (Doc. 1), a duração crítica da precipitação capaz de gerar a maior sobrelevação no reservatório da barragem B2A é a cheia decamilenar de 5 dias de duração, que elevada o nível do reservatório da B2A até a El. 921,00 m, acumulando cerca de 870 mil m<sup>3</sup> de água. Para a mesma duração crítica, a sobrelevação no reservatório da barragem B2 atinge a El. 899,17 m, com um acúmulo de 57 mil m<sup>3</sup>. Mais detalhes do estudo hidrológico estão apresentados no Item 8.3.

Para o cenário de **dia seco (provável)**, utilizou-se dos níveis máximos reportados nos instrumentos das Tabelas 7.3 e 7.5, com os reservatórios secos, conforme estes majoritariamente se encontram ao longo do ano.

A Figura 8.15 apresenta um perfil longitudinal das Barragens B2 e B2A com os respectivos NAs resultantes (maciço e reservatório), para os cenários de dia chuvoso (extremo) e seco (provável). As Tabelas 8.8 e 8.9 apresentam um resumo dos volumes

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

mobilizados<sup>2</sup> (saturados, secos, e água livre), e a concentração volumétrica resultante<sup>3</sup>, para os cenários de dia chuvoso (extremo) e seco (provável), respectivamente. **As superfícies de ruptura acompanham o deslocamento integral e instantâneo dos maciços e rejeitos, conforme apresentado nas Figuras 8.11 a 8.13.**

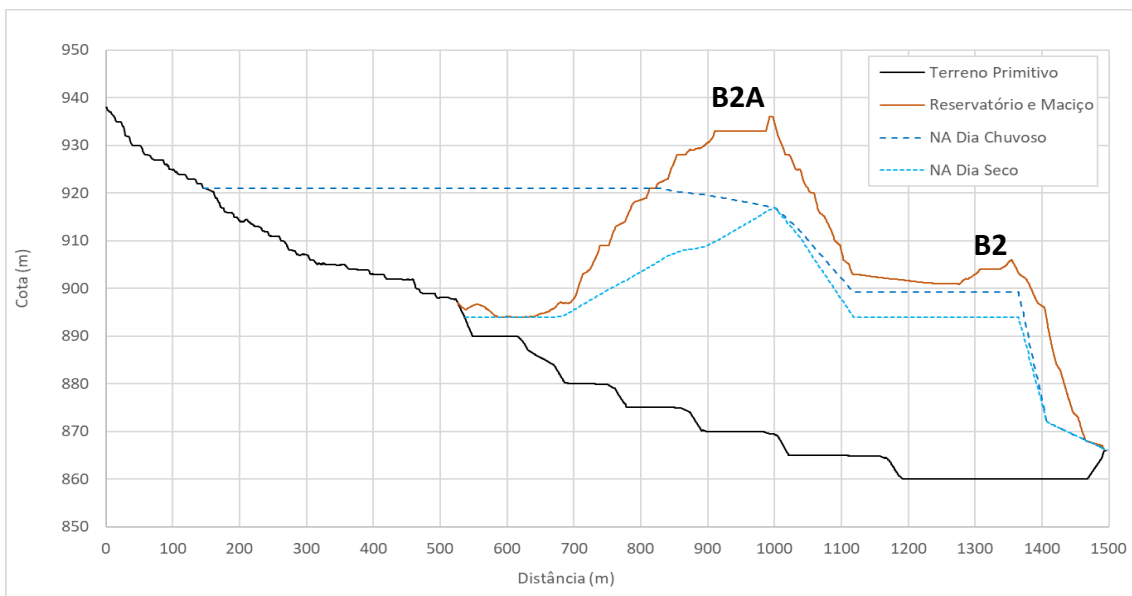


Figura 8.15 – Perfil longitudinal do reservatório, incluindo a topografia atual, primitiva e NAs

Tabela 8.8 – Resumo dos volumes mobilizados nas rupturas (dia chuvoso - extremo)

Cenário de Dia Chuvoso	
Volume Total dos Maciços e Rejeitos das Barragens B2 e B2A	7.960.826,0 m <sup>3</sup>
Volume Saturado dos Maciços e Rejeitos – Abaixo do NA	4.949.110,0 m <sup>3</sup>
Volume Não Saturado dos Maciços e Rejeitos – Acima do NA	3.011.716,0 m <sup>3</sup>
Volume de Água Livre nos Reservatórios	925.867,7 m <sup>3</sup>
Concentração Volumétrica (CV) estimada	54%

Tabela 8.9 – Resumo dos volumes mobilizados nas rupturas (dia seco - provável)

Cenário de Dia Seco	
Volume Total dos Maciços e Rejeitos das Barragens B2 e B2A	7.960.826,0 m <sup>3</sup>
Volume Saturado dos Maciços e Rejeitos – Abaixo do NA	3.888.123,0 m <sup>3</sup>
Volume Não Saturado dos Maciços e Rejeitos – Acima do NA	4.072.703,0 m <sup>3</sup>
Volume de Água Livre nos Reservatórios	0,0
Concentração Volumétrica (CV) estimada	67%

<sup>2</sup> Obtidos a partir do reporte de volumetria no Civil 3D, com a projeção dos NAs dos instrumentos e reservatórios (quando existente).

<sup>3</sup> Considerando um índice de vazios médio de 1,0 para o rejeito e maciço.



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Em ambos os cenários foi utilizado a totalidade do volume dos maciços e reservatórios (100%) das Barragens B2 e B2A, representando cerca de 7,96 milhões de m<sup>3</sup> mobilizados (com adicional de água livre no dia chuvoso). Em vista da pequena representatividade do volume do reservatório da Ecológica I (57 mil m<sup>3</sup>) frente ao volume total mobilizado (7,96 milhões de m<sup>3</sup>), representando menos de 1% do volume total, este volume (ruptura em cascata dessa estrutura) já foi contabilizado dentro do volume global de ruptura de ambas as estruturas em conjunto.

Os hidrogramas de ruptura resultantes da mobilização instantânea para ambos os cenários são apresentados na Figura 8.16. Os hidrogramas de ruptura resultantes apresentam picos aproximados de 66.000 m<sup>3</sup>/s para o cenário de dia chuvoso (extremo) e 55.000 m<sup>3</sup>/s para o cenário de dia seco (provável), com duração inferior a 4 minutos, caracterizando um cenário conservador e aplicável.

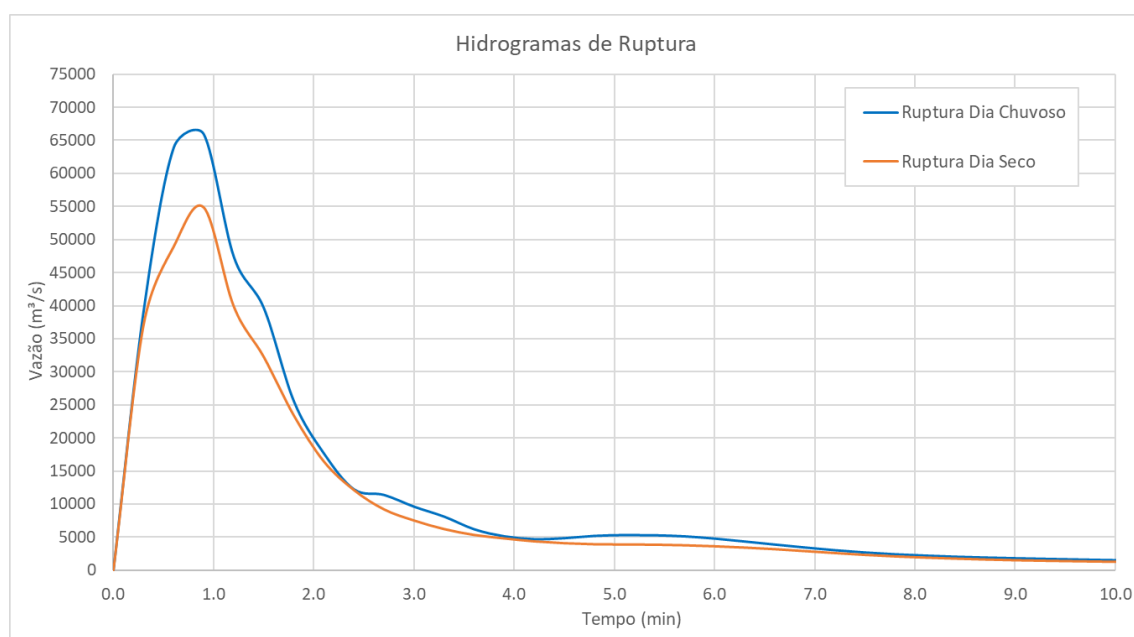


Figura 8.16 – Hidrogramas de ruptura para os cenários de dia chuvoso e seco.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## 8.5 Propagação de Hidrogramas

### 8.5.1 Descrição do trecho de propagação

A propagação da onda de ruptura hipotética das Barragens B2 e B2A foi simulada ao longo da região de jusante da estrutura por cerca de 24 km. A região é composta de dois cursos de água principais, sendo: (i) o Córrego Fazenda Velha, situado desde a região da barragem (Km 0) até a confluência com o Rio das Velhas (Km 8,5), caracterizado por um curso de água de pequenas dimensões, bem encaixado e com elevada declividade (1,38%), onde não há ocupações permanentes nem qualquer infraestrutura de acesso; (ii) o Rio das Velhas, situado desde a confluência com o Córrego Fazenda Velha (Km 8,5) até a jusante das principais ocupações urbanas ribeirinhas do município de Rio Acima (Km 24,3), caracterizado por um curso de água de médio porte e baixas declividades (0,15%), com vales mais encaixados nos primeiros 10 quilômetros (sem ocupações próximas às margens do rio), os demais 6 quilômetros de propagação composto de planícies de inundação onde se localizam as ocupações urbanas do município de Rio Acima,. Apresenta-se na Figura 8.18 uma visão geral do trecho de propagação da região de jusante, e na Figura 8.17 um perfil longitudinal do trecho de propagação.

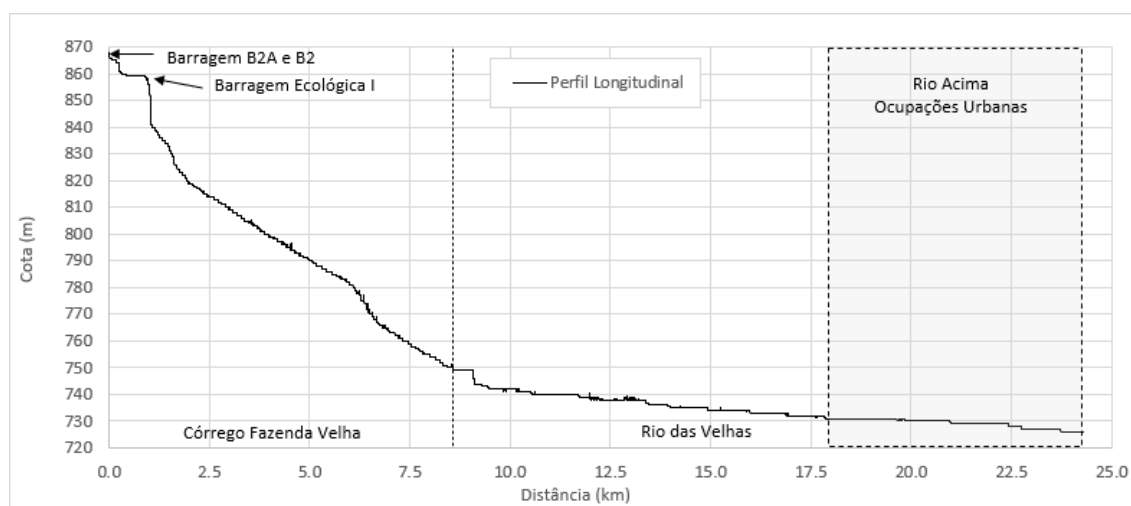


Figura 8.17 – Perfil longitudinal do trecho de propagação.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

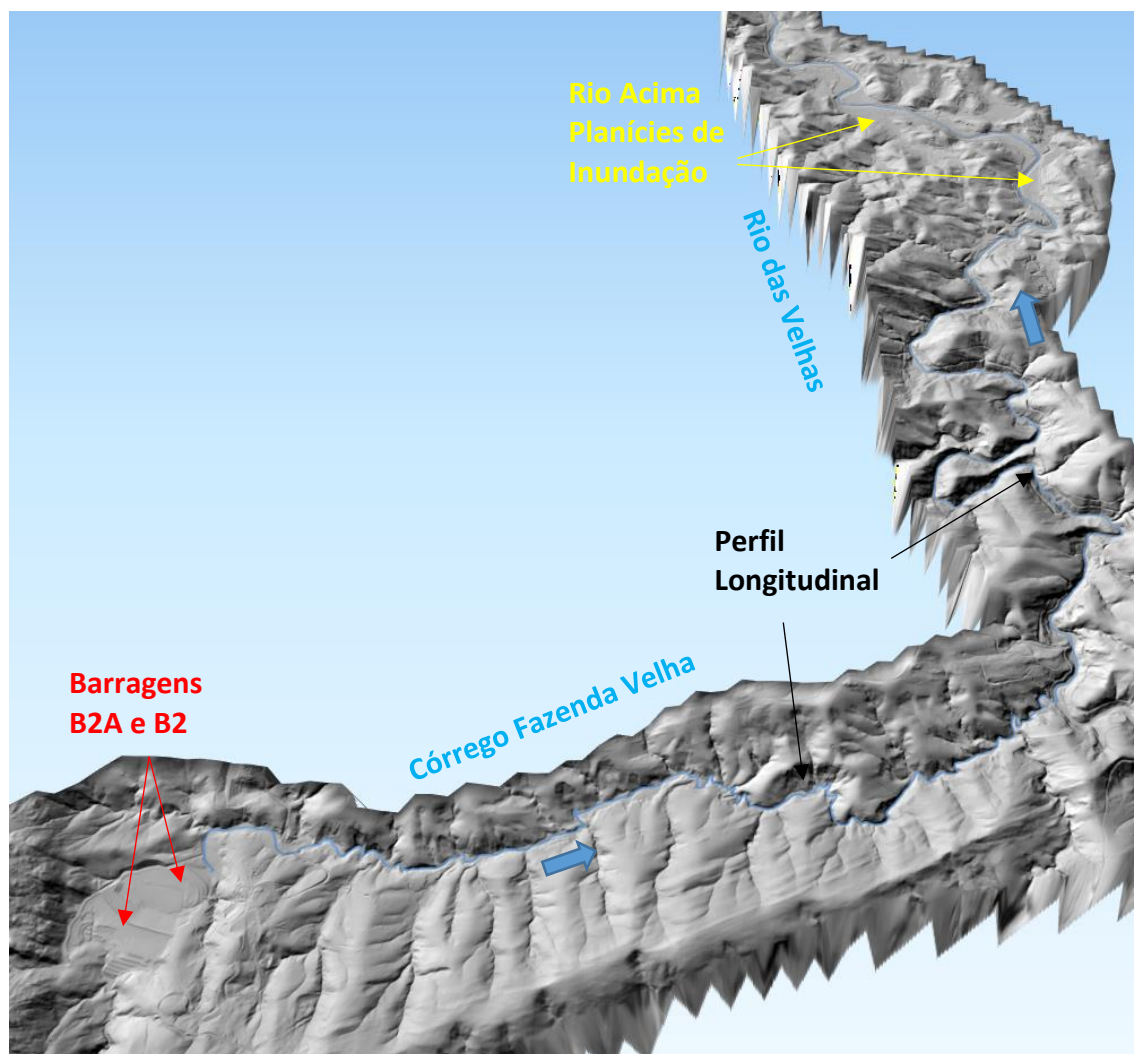


Figura 8.18 – Perspectiva do trecho de propagação.

### 8.5.2 Base Topoaltimétrica

Os dados topográficos disponibilizados abrangem toda a região da barragem, assim como aproximadamente 25 km para o vale a jusante, e são compostos de:

- Base topográfica em curvas de níveis equidistantes de metro em metro proveniente de um perfilamento a laser (Lidar) de elevada precisão (acurácia média vertical de 0,10 m e horizontal de 0,15 m, e PEC 0,27) por meio de aeronave, realizado pela AEROSAT em agosto de 2022 (Doc. 10) - Datum Sirgas 2000, UTM Zona 23 Sul (processados a um arquivo *Raster* de 1,0 x 1,0 m);



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Segundo o Doc. 10, o levantamento altimétrico elaborado pela AEROSAT atende as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Brasileira Decreto nº 89.817/1984, e entende-se que essa base topográfica está em escala apropriada e representa fidedignamente o terreno e vale de jusante. **Os dados topográficos são de elevada resolução espacial, possuem detalhamento para uma boa representatividade da mancha de inundação, e atendem com êxito as especificações do TR ERHB FEAM.**

A Figura 8.19 apresenta uma visão geral do MDT utilizado no estudo, representada pela região da área de jusante (calha fluvial e terrenos adjacentes).

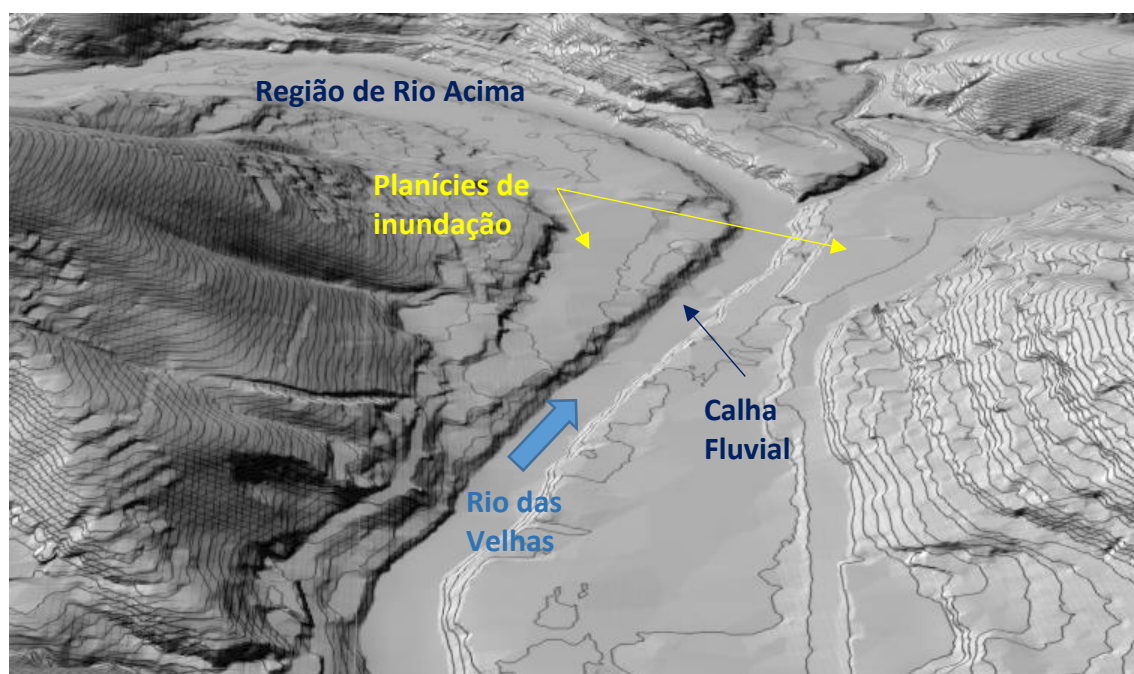


Figura 8.19 – Visão Geral do MDT utilizado no estudo apresentando o trecho de jusante com detalhe para a calha fluvial e planícies de inundação.

Apesar de não possuir levantamento topobatimétrico do curso de água, entende-se que o MDT já possui boa representatividade da calha fluvial, e atende com êxito os objetivos do trabalho, frente às incertezas associadas.

O imageamento utilizado para verificação das estruturas e contornos hidráulicos, além da elaboração dos mapas foram obtidos a partir do banco de dados do Google Earth®, com imageamento recente (2022/2023).

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

### 8.5.3 Ruptura em Cascata

Entende-se que a combinação dos cenários de **instabilização do maciço e liquefação dos rejeitos** é um cenário passível de causar um maior dano a jusante e foi considerado na avaliação do hidrograma de ruptura. Em vista da integração física entre o reservatório da Barragem B2 e o maciço da Barragem B2A, será considerado a **ruptura conjunta das barragens**, ou seja, a cascata entre as Barragens B2 e B2A. Mesmo com a localização da barragem Ecológica I a jusante e próximo das Barragens B2 e B2A, em vista da pequena representatividade do volume do reservatório da Ecológica I (57 mil m<sup>3</sup>) frente ao volume total mobilizado das barragens B2 e B2A (7,96 milhões de m<sup>3</sup>), representando menos de 1% do volume total, este volume (ruptura em cascata dessa estrutura) já foi contabilizado dentro do volume global de ruptura de ambas as estruturas em conjunto (representação da ruptura em cascata).

Não há a presença de outra barragem no vale de jusante além das mencionadas acima, não havendo possibilidade de haver ruptura em cascata com demais estruturas.

### 8.5.4 Modelo matemático-computacional

Para a simulação da propagação da onda de ruptura hipotética, aplicou-se o modelo computacional bidimensional RiverFlow2D® (HYDRONIA, 2021), baseado nas equações de águas rasas (*Shallow Water Equations*), resultante de simplificações atribuídas às equações de movimento de *Navier-Stokes*.

Esse modelo matemático, não inclui os termos de dispersão e turbulência. A dissipação de energia e turbulência é considerada apenas pela aplicação do parâmetro de rugosidade de Manning (*n*) nas equações de *momentum*. As equações desse modelo matemático foram solucionadas pelo método aproximado de Riemann aplicado a volumes finitos.

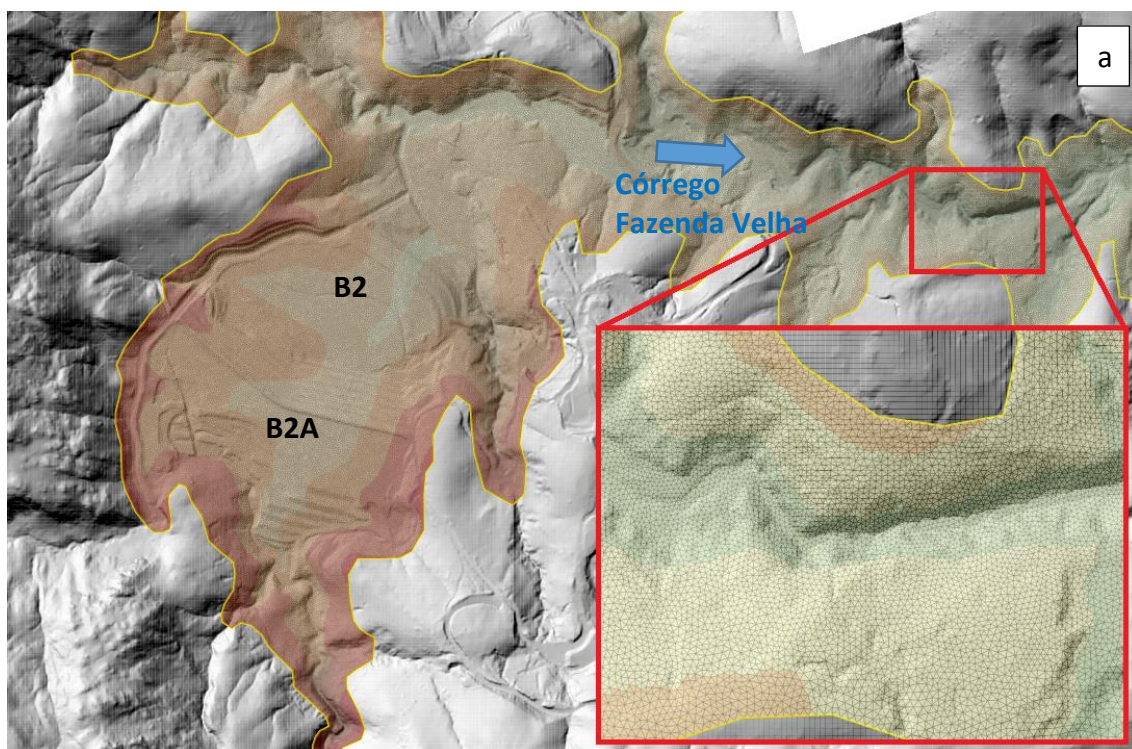
Para os escoamentos hiperconcentrados, o módulo de corrida de lama, detritos e rejeitos (*Mud and Tailings Flow – MT*) possui disponíveis 8 formulações reológicas, e trabalha com fluídos diluídos (escoamento turbulento) a fluídos mais concentrados (movimento de massa). De acordo com a formulação reológica utilizada, o modelo leva em consideração os parâmetros mais característicos e representativos da massa, os

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

quais fazem parte a tensão de cisalhamento ( $\tau_y$ ), a viscosidade dinâmica ( $\eta$ ), a densidade do fluido ( $\rho$ ) e o ângulo de repouso do material.

Independentemente da distância entre os elementos de cálculo, para a convergência numérica do modelo hidrodinâmico, o RiverFlow2D® apresenta intervalo de tempo computacional variável e automático, sempre respaldado pelo critério de estabilidade de *Courant–Friedrichs–Lewy* (CFL).

Para a definição dos volumes finitos de controle, o modelo RiverFlow2D® utiliza malhas não-estruturadas capazes de representar adequadamente o contorno geométrico do terreno. Para o estudo de ruptura hipotética das Barragens B2 e B2A foi construída uma única malha de simulação para a região da barragem e todo o trecho de propagação, com refinamento de células variando entre 1,2 a 7,1 metros, resultando em uma malha com aproximadamente 1,13 milhão de células computacionais. A Figura 8.20 apresenta parte da malha computacional nas proximidades das Barragens B2 e B2A e ao longo do curso de água de jusante.





	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

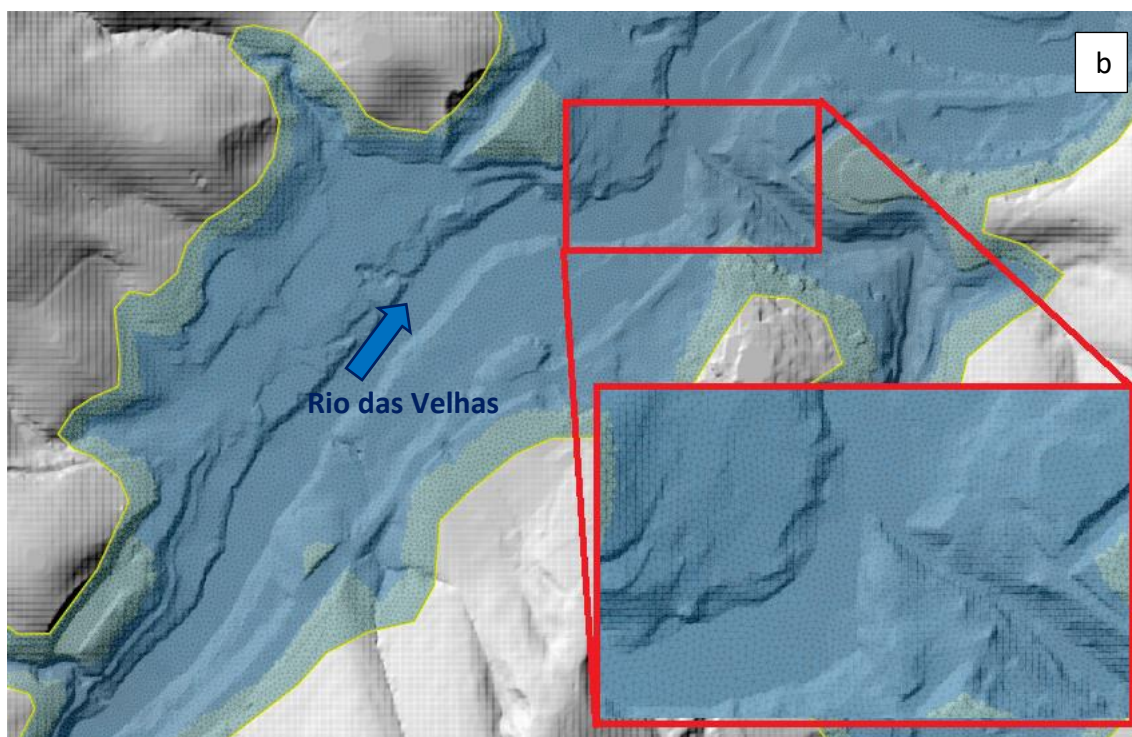


Figura 8.20 – Detalhe da configuração da malha computacional e refinamento com a utilização do software RiverFlow2D: (a) próximo às barragens e (b) no curso de água de jusante.

### 8.5.5 Parâmetros de resistência

Em consonância com os objetivos desse trabalho, a simulação da propagação da onda de cheia aplicou o modelo matemático de propagação de lama e detritos. Quando da utilização de determinadas formulações reológicas (que incluem a tensão turbulenta), o coeficiente de Manning é aplicado como o parâmetro de rugosidade do terreno.

Para a representação bidimensional dos parâmetros de rugosidade de Manning, os coeficientes de rugosidade foram atribuídos a partir de consulta a valores reportados em bibliografia (Chow, 1959). Para toda a região das barragens e de jusante, utilizou-se da representatividade regional de uso do solo<sup>4</sup> entre as classes de solo exposto, curso de água, vegetação densa e rasteira, conforme pode ser observado na Figura 8.21.

<sup>4</sup> Classificação do uso do solo a partir de imagens recentes do LANDSAT

	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	Nº Brazil Hydro
		CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

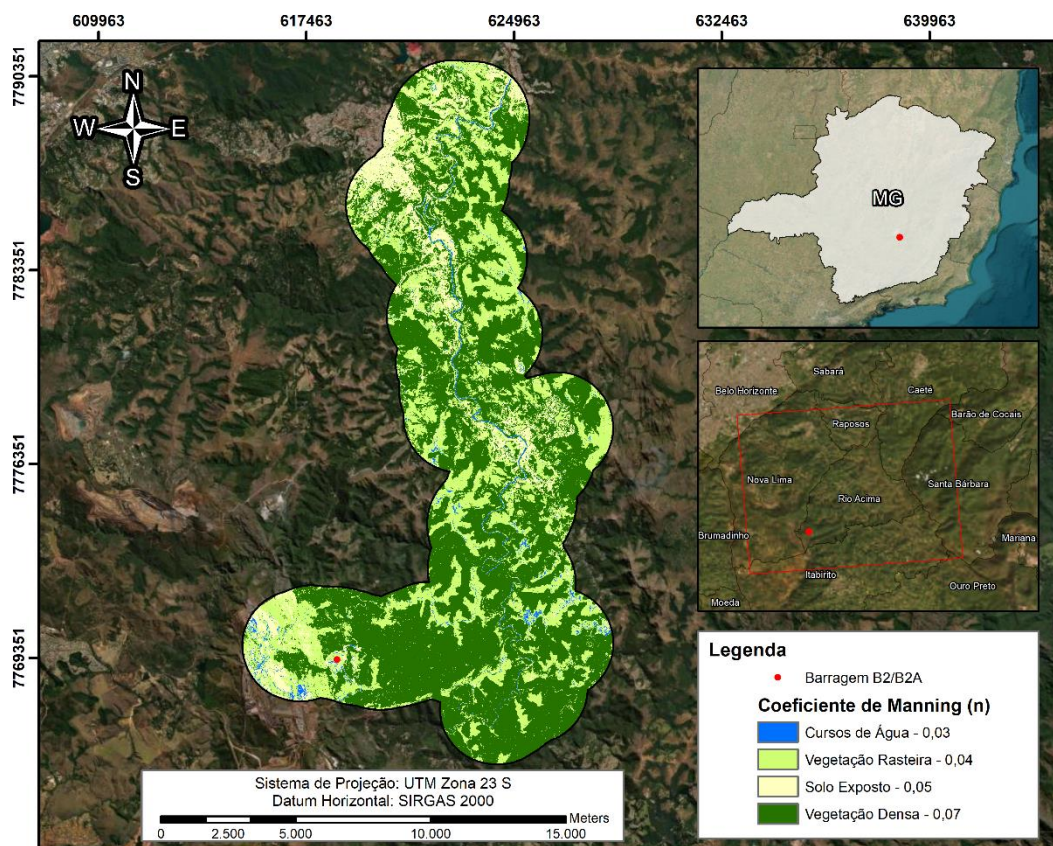


Figura 8.21 – Uso e ocupação do solo com seus respectivos coeficientes de rugosidade.

### 8.5.6 Aspectos reológicos do rejeito

A utilização de parâmetros reológicos é representativa para se obter uma assertividade maior na propagação dos rejeitos, que podem apresentar resultados de tempo, distância e área inundada diferentes de quando se utiliza o fluido somente como água. Isso se deve ao fato de que a energia presente na mecânica do fluxo dos rejeitos quando de uma eventual ruptura (peso e velocidade do fluxo), quando passa a ser superada pelas forças de resistência ao fluxo (cisalhantes e turbulentas), forças viscosas ao longo da base do fluxo e forças de tensão com a superfície do terreno, faz com que o fluido reduza velocidade e tenda ao repouso. Quanto maior a concentração de sedimentos na massa, maior serão as tensões internas no fluido, e maior energia será necessária ao escoamento da massa.

Os ensaios reológicos foram realizados sobre amostras de rejeito das Barragens B2 e B2A, porém, as amostras da B2A apresentam somente resultados para baixas

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

concentrações volumétricas, ficando distantes dos valores de concentração volumétrica ( $C_v$ ) estimados para os maciços e rejeitos (Tabelas 8.8 e 8.9). Em vista dos rejeitos das Barragens B2 e B2A apresentarem as mesmas características, optou-se por considerar somente os ensaios da B2, que possui uma representatividade maior nas faixas superiores de  $C_v$ .

Em vista da utilização de um modelo de propriedades reológicas variáveis com a variação da concentração volumétrica ( $C_v$ ), é necessário que sejam inseridas as equações reológicas para cálculo da tensão de escoamento variando no tempo e espaço. Essas equações reológicas permitem que seja possível entrar com um escoamento de vazão de base de cheia natural, juntamente a um fluxo hiperconcentrado proveniente da ruptura hipotética da barragem e seus rejeitos mobilizados. Utilizando-se dos valores resultantes de concentração de sólidos pela tensão de escoamento da Tabela 7.7, apresenta-se a seguir a função exponencial de melhor ajuste utilizada, também apresentado no gráfico da Figura 8.22.

$$\text{Tensão de Escoamento (Pa)} = 5,7442e^{10,971.C_v} - \text{Equação 8.1}$$

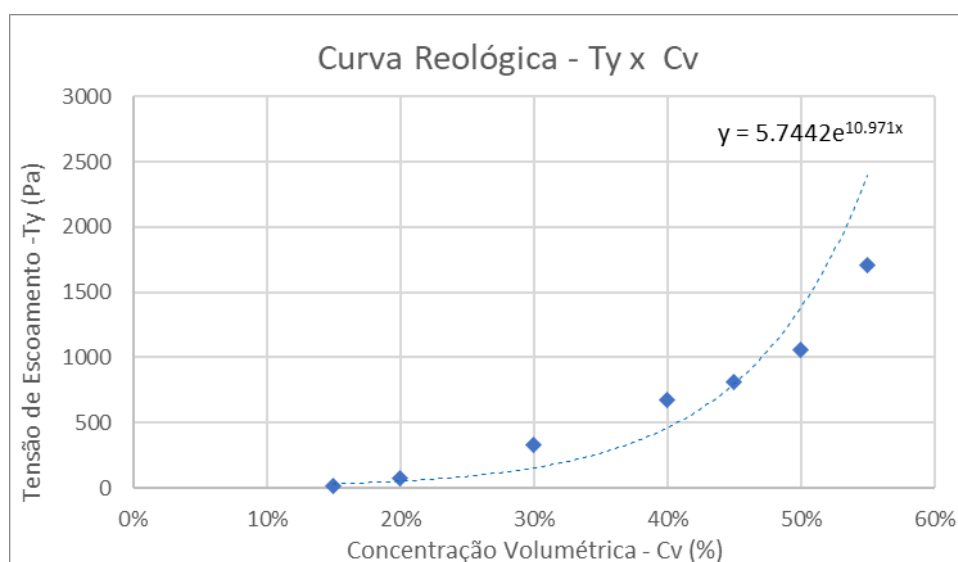


Figura 8.22 – Dados reológicos e curva de melhor ajuste

A Tabela 8.10 a seguir apresenta um resumo geral dos parâmetros reológicos iniciais para o maciço e rejeito das Barragens B2 e B2A, nos cenários de dia chuvoso e seco. Para o cenário de dia seco, em vista da limitação dos ensaios não superar o  $C_v$  de 55%, optou-se por utilizar esse valor máximo ao invés da extrapolação dos valores



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

resultantes da massa de 67%. Já para o cenário de dia chuvoso, uma sensibilidade de 10% a menos foi aplicada, resultando em um Cv de 50% (menor do que o estimado de 54%).

Tabela 8.10 – Parâmetros reológicos da massa a ser mobilizada nos cenários de simulação.

Cenários Simulados	Cenário Dia Chuvoso (Maior Dano)	Cenário Dia Seco
Volume Mobilizado (milhões de m³)	8,89	7,96
Concentração Volumétrica Inicial (Cv)	50%	55%
Densidade Aproximada da Massa - $\rho$ (Kg/m³)*	2,00	2,00

\*Estimado segundo o volume de sólidos e ensaio reológico do rejeito (Doc. 6).

### 8.5.7 Condições iniciais e de contorno

Para as simulações hidráulicas da ruptura hipotética das Barragens B2 e B2A aplicaram-se condições de contorno compatíveis com o sistema simulado e com os objetivos do estudo, tal como sintetizado a seguir:

- A condição de contorno de entrada para a simulação consistiu na utilização da geometria atual das Barragens B2 e B2A sobre a geometria da configuração primitiva no interior do reservatório, como pode ser observado na Figura 8.13. Essa condição conta ainda com os parâmetros reológicos conforme descrito na Tabela 8.10;
- Como condição de contorno de jusante, foi utilizada a profundidade normal, definido pela declividade média do trecho final de simulação, no Rio das Velhas (0,002 m/m);
- Como equação reológica para propagação da massa de rejeito em ambos os cenários, optou-se pela utilização da formulação *Turbulent and Yield*, que leva em consideração a tensão de cisalhamento ( $\tau_y$ ), a densidade do fluido ( $\rho$ ) e a rugosidade do terreno ( $n$ ), ou seja, tensões de escoamento e turbulenta. A propagação dos rejeitos foi simulada considerando um modelo de propriedades reológicas variáveis, conforme Equação 8.1. O modelo numérico não utilizou a função de erosão da calha fluvial e terrenos adjacentes em vista da complexa representação física de tal fenômeno,

 	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

sendo já representativa a abordagem de deposição dos rejeitos pelo vale de jusante sem tal premissa;

- Em vista da pequena dimensão das bacias hidrográficas contribuintes da área a montante das Barragens B2 e B2A, aliado a uma duração crítica de precipitação de 5 dias, as consequentes vazões do Córrego Fazenda Velha são insignificantes perante as vazões provenientes da ruptura (hidrogramas de ruptura). Assim, considerou-se a região da barragem até a chegada no Rio das Velhas sem vazão de base. Já em relação aos cursos de água perenes e de médio porte como o Rio das Velhas, para o cenário de dia chuvoso foi considerado à entrada de vazões das cheias de TR 100 anos em estado permanente, com concentração volumétrica de sólidos zero ( $C_v = 0,0 \%$ ). Já para o cenário de dia seco, foram considerados ambos os cursos de água sem vazões, pela insignificância diante da ruptura;
- Pela falta de cadastramento e pequenas dimensões das pontes existentes a jusante, estas não alterariam o comportamento do escoamento, e, portanto, não foram inseridas no modelo computacional;
- O volume da Barragem Ecológica I (cascata) foi contemplado na simulação de ruptura das Barragens B2 e B2A, conforme detalhes apresentados no Item 8.4.1 (pg. 44).

#### **8.5.8 Critério de Parada da Modelagem Hidráulica**

O critério de parada da mancha de ruptura das Barragens B2A e B2 foi definido a partir da sobrelevação da onda de ruptura sobre a cheia natural em valores inferior a 2 pés (0,61 m), conjuntamente aos demais parâmetros hidráulicos (risco hidrodinâmico), observando as regiões em que não se espera mais impactos incrementais da onda de ruptura. Vale ressaltar que a deposição completa da massa se apresenta também como um critério de parada da onda de ruptura.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## 8.6 Resultados do Estudo de Ruptura Hipotética

Para a devida interpretação e conhecimento da extensão da inundação e impactos potenciais associados da ruptura hipotética das Barragens B2 e B2A, foram extraídos os resultados necessários a partir das manchas de inundação potencial e das seções transversais de referência. Esses parâmetros são guias preliminares que podem auxiliar o mapeamento do risco e planejamento de ações emergenciais numa eventual ruptura das Barragens B2 e B2A, conforme premissas abordadas nesse relatório.

Em representação aos resultados dos hidrogramas de propagação dos cenários simulados, apresenta-se na Figura 8.23 as seções transversais de controle, comum a ambos os cenários (extremo e provável). As seções foram alocadas de 1,0 em 1,0 km dentro da ZAS, além de próximas a pontos notáveis nos demais trechos. As nomenclaturas estão em acordo com a distância da barragem (km), e apresentam-se distribuídas conforme: S-0.0 a S-8.0 na região da barragem e pelo vale do Córrego Fazenda Velha; S-9.0 a S-24.2 no Rio das Velhas. A seção S-0.0 tem a função de reportar o hidrograma de ruptura da respectiva estrutura, conforme resultados já apresentados na Figura 8.16.

A Tabela 8.11 apresentam os resultados nas seções de referências para o cenário de dia chuvoso (extremo). As Figuras 8.24 e 8.25 apresentam o hidrograma em seções de referência, selecionadas para melhor interpretação dos resultados. As vazões constantes (523 m³/s) na Figura 8.25 representam a cheia de TR 100 anos no Rio das Velhas.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

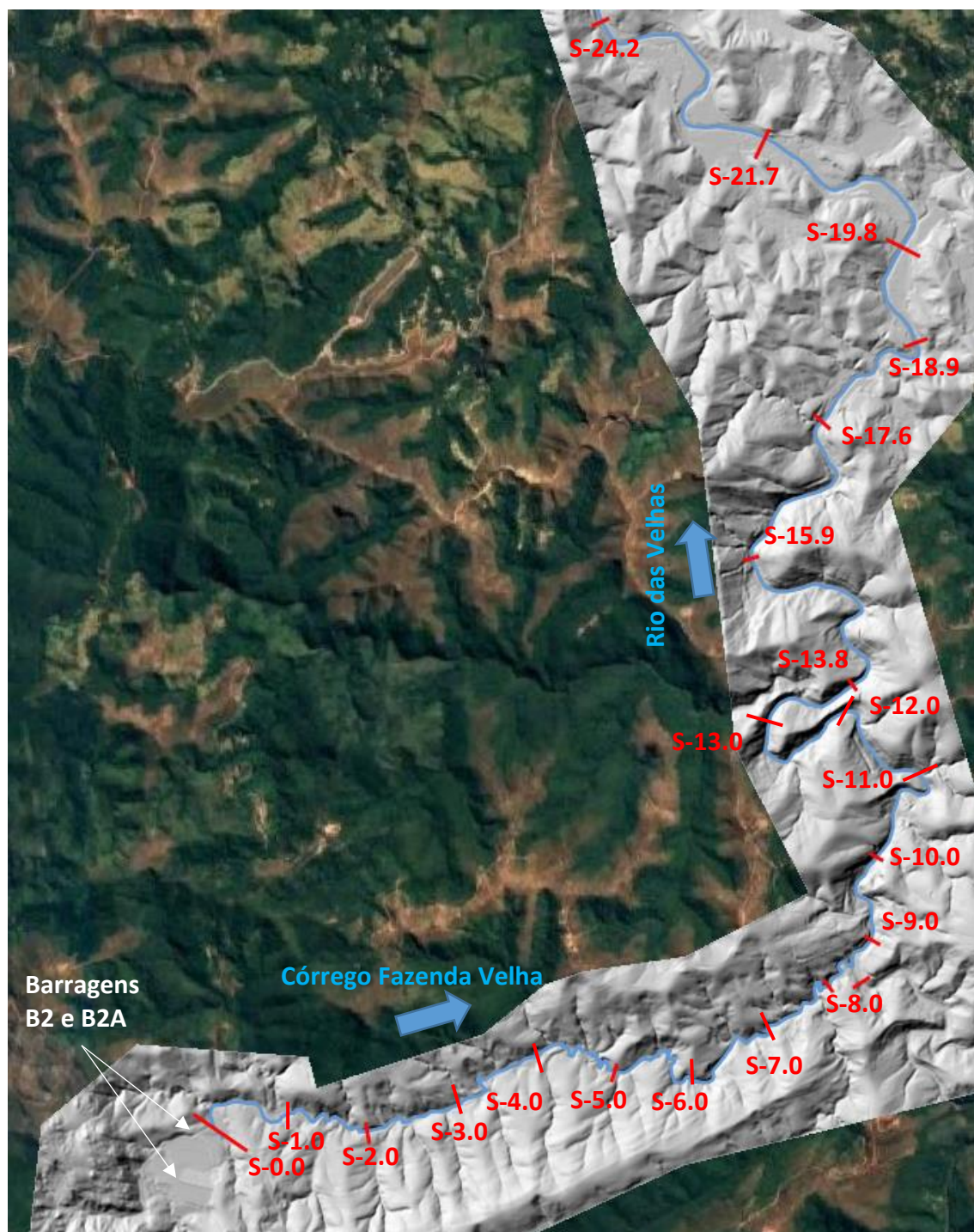


Figura 8.23 – Seções transversais de controle (Detalhes no Anexo I)

	TÍTULO		Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A		CSN-F3-RL-003-02
			Nº CSN Mineração
			MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

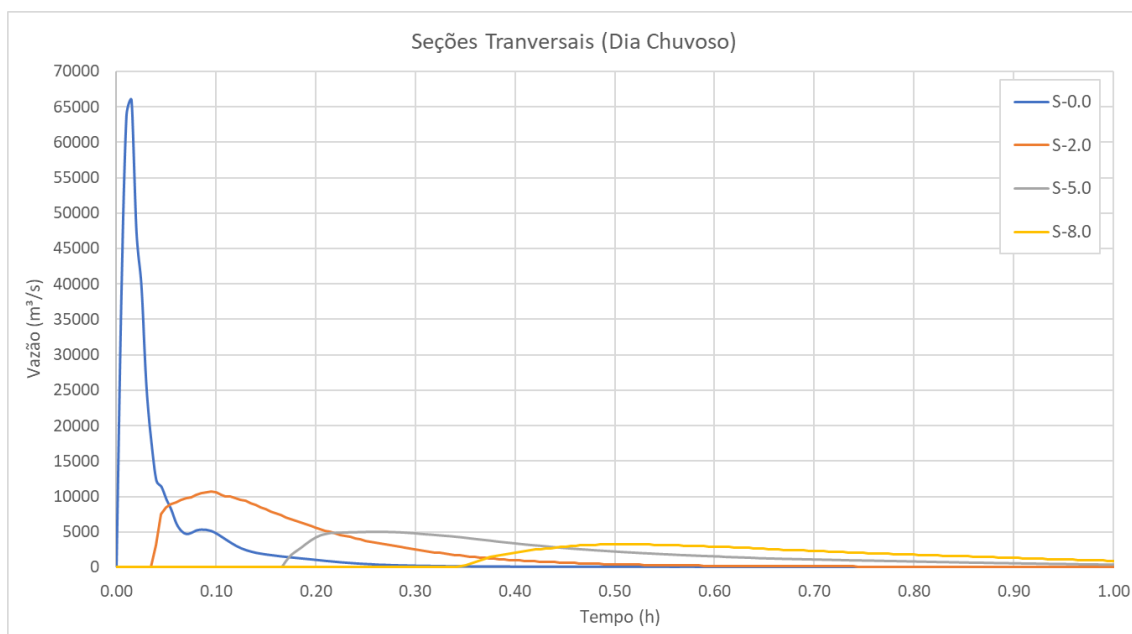


Figura 8.24 – Hidrograma nas seções transversais seleccionadas (S-0.0 a S-8.0).

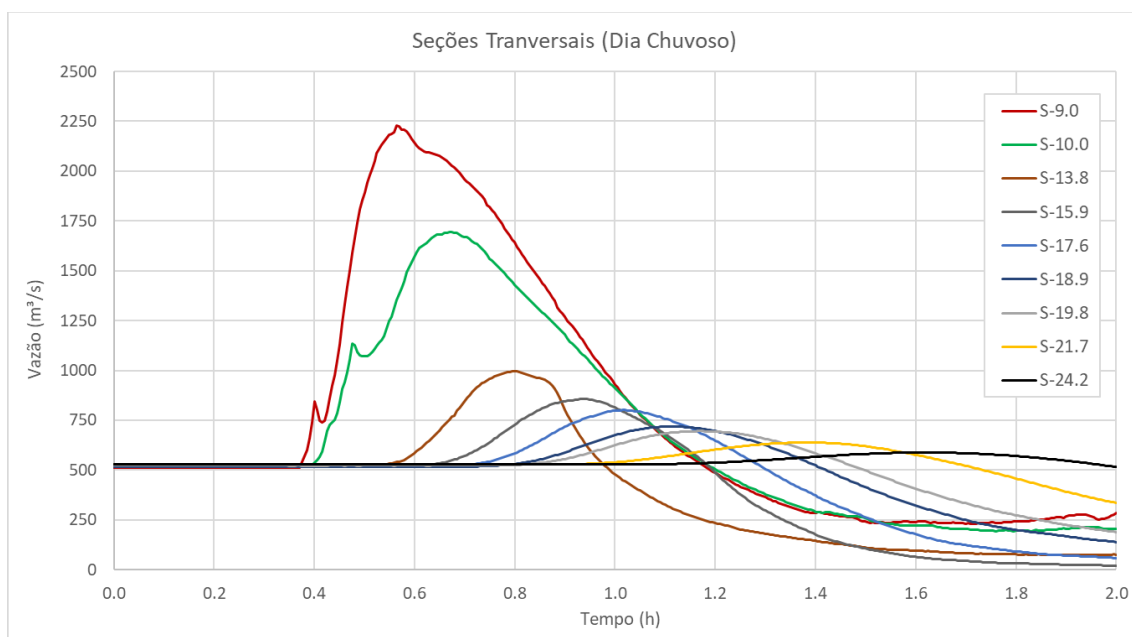


Figura 8.25 – Hidrograma nas seções transversais seleccionadas (S-9.0 a S-24.2).

 	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Tabela 8.11 – Resultados em seções transversais de referência para o cenário de dia chuvoso (extremo).

Seção		Distância da Barragem (km)	Cenário Dia Chuvoso (Extremo - Maior dano)*							
			Vazão de Pico (m³/s)	Tempo de Chegada	Tempo de Pico	Velocidade Máxima (m/s)	Profundidade Máxima (m)	Risco Hidrodinâmico Máximo (m²/s)	Cota de Fundo (m)	Inundação ** Incremental (m)
ZAS	S-0.0	0,0	65900	00h00min	00h01min	24,60	40,01	479	867,20	40,01
	S-1.0	1,0	18403	00h01min	00h03min	20,64	32,47	440	838,97	32,47
	S-2.0	2,0	10690	00h02min	00h06min	18,85	27,88	394	819,00	27,88
	S-3.0	3,0	8969	00h04min	00h08min	10,79	20,17	187	810,00	20,17
	S-4.0	4,0	7247	00h06min	00h10min	9,18	22,60	123	800,00	22,60
	S-5.0	5,0	5043	00h10min	00h16min	14,66	22,61	236	790,00	22,61
	S-6.0	6,0	3799	00h12min	00h24min	10,67	26,94	197	777,00	26,94
	S-7.0	7,0	3426	00h17min	00h27min	5,89	25,17	109	762,00	25,17
	S-8.0	8,0	3253	00h21min	00h31min	8,99	20,40	132	753,00	20,40
	S-9.0	9,0	2228	00h23min	00h34min	5,79	23,27	64	749,00	17,96
	S-10.0	10,0	1693	00h24min	00h40min	3,58	24,36	55	742,00	14,47
	S-11.0	11,0	1224	00h26min	00h43min	3,26	21,61	41	740,00	11,03
	S-12.0	12,0	1131	00h28min	00h45min	2,92	19,04	38	739,00	9,44
	S-13.0	13,0	1032	00h31min	00h47min	3,70	15,63	43	738,00	6,93
Regiões Florestadas	S-13.8	13,8	996	00h33min	00h48min	3,18	12,98	33	736,00	4,91
	S-15.9	15,9	857	00h39min	00h56min	3,17	8,78	27	734,00	1,76
Zona Urbana Rio Acima	S-17.6	17,6	801	00h44min	01h01min	2,77	7,86	22	731,50	0,88
	S-18.9	18,9	718	00h49min	01h08min	2,45	7,12	17	731,00	0,64
	S-19.8	19,8	696	00h51min	01h10min	2,38	7,16	17	730,00	0,52
	S-21.7	21,7	638	00h57min	01h23min	2,56	6,17	14	729,00	0,30
	S-24.2	24,2	588	01h08min	01h37min	2,00	7,25	14	726,00	0,24

\*Valores máximos reportados na seção transversal, podendo variar de acordo com a região da seção transversal, não recomendado a ser utilizado para a representatividade dos resultados.

\*\* Diferença entre as profundidades do cenário de ruptura e da cheia de TR 100 (Prof. Dia Chuvoso – Prof. Cheia)



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Para o cenário de dia chuvoso é possível observar um elevado amortecimento do pico da onda de ruptura no Córrego Fazenda Velha, nos primeiros 8 km, em função dos controles hidráulicos e restrições ao escoamento impostas pela geometria/topografia do vale. Nessa região, devido às elevadas declividades, é onde ocorrem as maiores velocidades e o maior risco hidrodinâmico, resultado também do desconfinamento instantâneo dos maciços e rejeitos das Barragens B2 e B2A.

Ao adentrar o Rio das Velhas, que possui uma calha mais larga e menores declividades, o escoamento se propaga de maneira mais lenta, e se mistura com a cheia de TR 100 anos já presente na calha do rio. Devido à elevada tensão de escoamento e densidade do material, a massa de rejeitos se deposita na calha do Rio das Velhas por aproximados 7 km (Figura 8.26), criando um enorme bloqueio longitudinal de até 15 a 20 metros de altura, cessando as vazões de cheia por um período na calha fluvial (ver hidrogramas, vazões tendendo a zero a partir da primeira hora). A título de exemplo, esse mesmo processo ocorreu no Rio Paraopeba, em menor magnitude, quando da chegada dos rejeitos da ruptura da Barragem B1 da Vale (Figura 8.27). Não é esperado mobilização desse rejeito e a geração de uma nova onda de ruptura, ou seja, as vazões de cheia, independente da sua magnitude (Tempo de Retorno - TR), devem ser retomadas ao vencer a elevação da deposição de rejeitos, resultando em um aumento da concentração em suspensão para jusante (sem picos superiores as vazões de cheia).

Com isso, somente a parte frontal da onda de ruptura se mistura junto as cheias do Rio da Velhas e avança em conjunto pra jusante, gerando inicialmente picos maiores de 700 m³/s, porém se reduzindo consideravelmente ao continuar se propagando e adentrando ao município de Rio Acima. Assim, o cenário de dia chuvoso apresenta uma inundação incremental que se estende por aproximados 20 km entre a barragem e o Rio das Velhas, no município de Rio Acima, onde as inundações incrementais em profundidade e velocidade não apresentam mais potencial de impactos.

Em vista da elevada velocidade no trecho inicial do Córrego Fazenda Velha, a delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) se baseou no alcance da onda de inundação conforme os 30 minutos de avanço (13 km). As demais regiões mapeadas,

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

aproximados 11 km que incluem a região urbana e ribeirinha de Rio Acima, fazem parte da Zona de Segurança Secundária (ZSS).

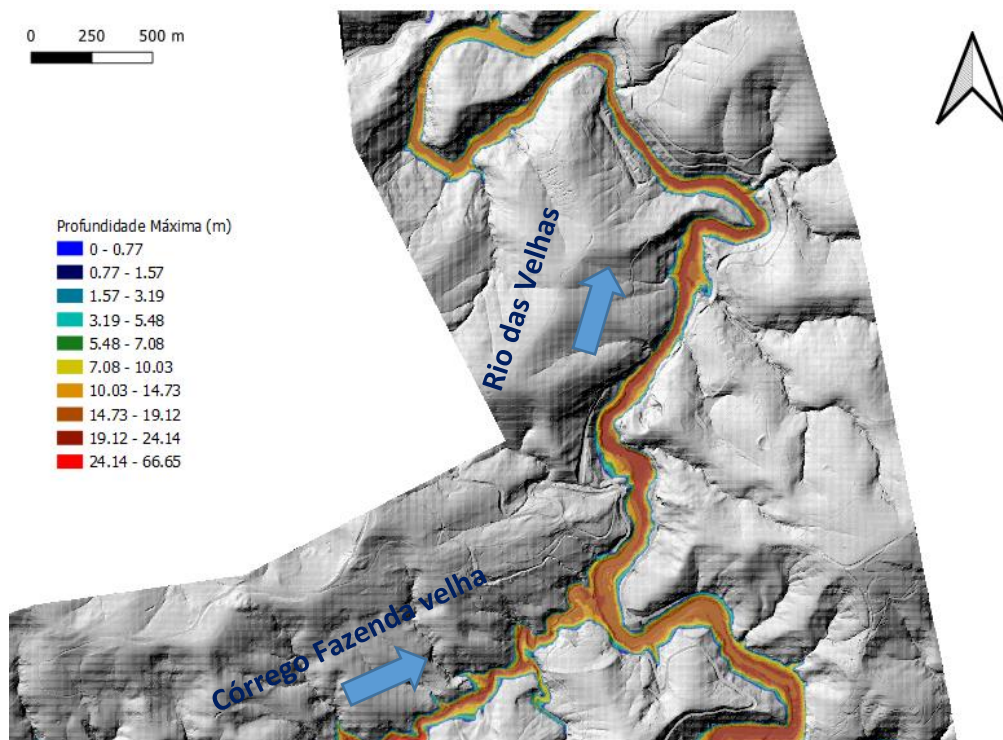


Figura 8.26 – Perfil da deposição de rejeitos no Rio das Velhas, mostrando um bloqueio extenso por mais de 7 km.



Figura 8.27 – Exemplo da deposição de rejeitos na calha do Rio Paraopeba pela mobilização dos rejeitos da Barragem B1 (Fonte: Estado de Minas, 2019).

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

A Tabela 8.12 apresentam os resultados nas seções de referências para o cenário de dia seco (provável). As Figuras 8.28 e 8.29 apresentam o hidrograma em seções de referência, selecionadas para melhor interpretação dos resultados. Como o volume rompido chega até a calha do Rio das Velhas e se deposita por completo, não há vazões reportadas a partir da seção S-12.0.

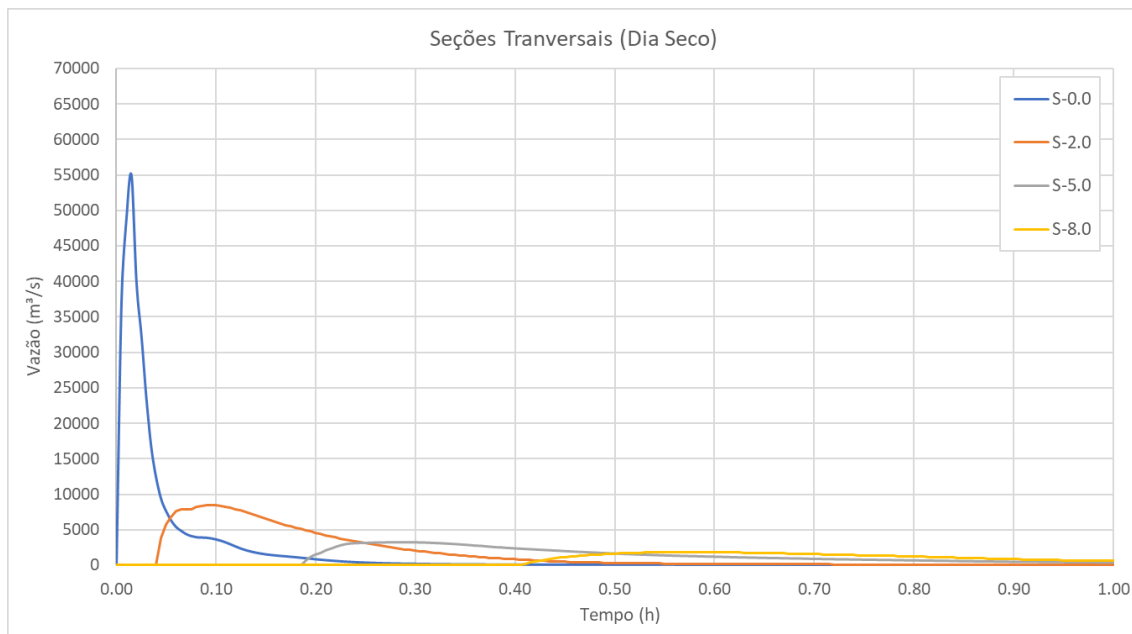


Figura 8.28 – Hidrograma nas seções transversais selecionadas (S-0.0 a S-8.0).

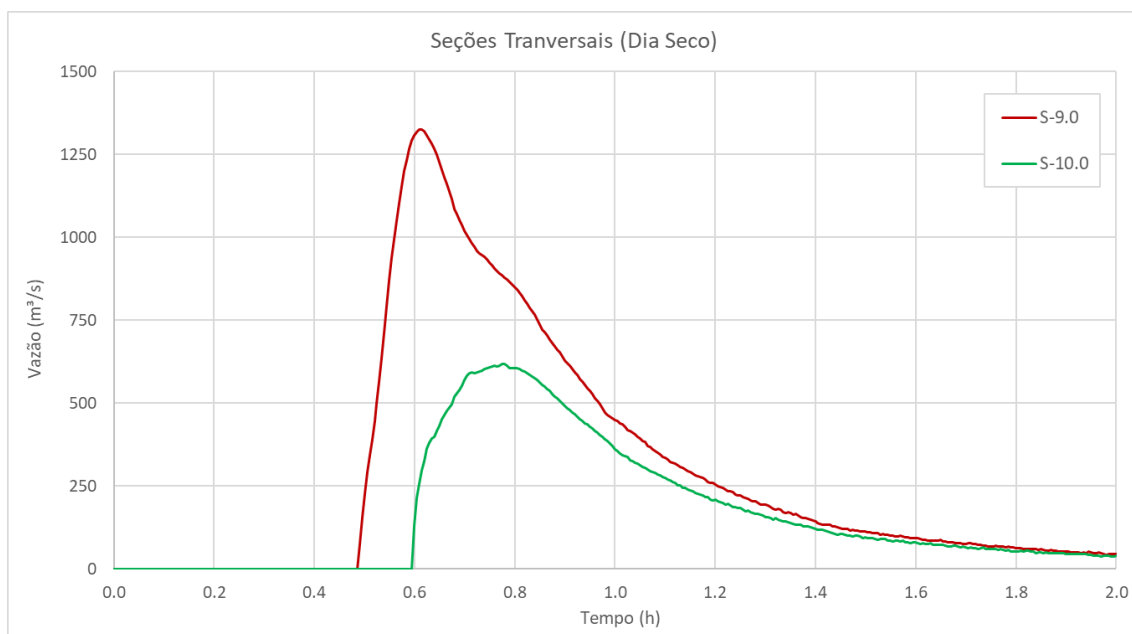


Figura 8.29 – Hidrograma nas seções transversais selecionadas (S-9.0 a S-24.2).

 	TÍTULO	N° Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		N° CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Tabela 8.12 – Resultados em seções transversais de referência para o cenário de dia seco (provável).

Seção		Distância da Barragem (km)	Cenário Dia Seco (Provável)*							
			Vazão de pico (m³/s)	Tempo de Chegada	Tempo de Pico	Velocidade Máxima (m/s)	Profundidade Máxima (m)	Risco Hidrodinâmico Máximo (m²/s)	Cota de Fundo (m)	Inundação ** Incremental (m)
ZAS	S-0.0	0,0	54920	00h00min	00h01min	24,04	36,25	432	867,20	36,25
	S-1.0	1,0	15469	00h01min	00h03min	17,52	30,11	389	838,97	30,11
	S-2.0	2,0	8514	00h03min	00h05min	17,77	26,48	353	819,00	26,48
	S-3.0	3,0	6942	00h05min	00h09min	9,97	19,44	150	810,00	19,44
	S-4.0	4,0	5369	00h07min	00h12min	8,13	21,21	91	800,00	21,21
	S-5.0	5,0	3216	00h11min	00h17min	12,56	20,38	179	790,00	20,38
	S-6.0	6,0	2272	00h14min	00h24min	7,10	22,74	153	777,00	22,74
	S-7.0	7,0	2011	00h21min	00h31min	5,00	20,50	74	762,00	20,50
	S-8.0	8,0	1859	00h25min	00h35min	6,79	16,64	84	753,00	16,64
	S-9.0	9,0	1325	00h29min	00h37min	4,25	16,65	42	749,00	16,65
	S-10.0	10,0	618	00h36min	00h47min	3,04	19,10	27	742,00	19,10
	S-11.0	11,0	205	00h45min	00h54min	2,00	15,07	12	740,00	15,07
	S-12.0	12,0	10	01h24min	01h42min	0,85	5,60	1	739,00	5,60

\*Valores máximos reportados na seção transversal, podendo variar de acordo com a região da seção transversal, não recomendado a ser utilizado para a representatividade dos resultados.

\*\* Diferença entre as profundidades do cenário de ruptura e a cota de fundo do terreno (Prof. Dia Seco – Terreno)

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

Para o cenário de dia seco é possível observar um elevado amortecimento do pico da onda de ruptura no Córrego Fazenda Velha, nos primeiros 8 km, em função dos controles hidráulicos e restrições ao escoamento impostas pela geometria/topografia do vale. Nessa região, devido às elevadas declividades, é onde ocorrem as maiores velocidades e o maior risco hidrodinâmico, resultado também do desconfinamento instantâneo dos maciços e rejeitos das Barragens B2 e B2A.

Ao adentrar o Rio das Velhas, que possui uma calha mais larga e menores declividades, o escoamento se propaga de maneira mais lenta, e, devido à elevada tensão de escoamento e densidade do material, a massa de rejeitos se deposita na calha do Rio das Velhas por completo, até o Km 12, criando um enorme bloqueio longitudinal, e cessando as vazões de cheia por um período na calha fluvial.

Para esse cenário, a condição de deposição completa da massa mobilizada nos primeiros quilômetros do Rio das Velhas não traz inundação e impactos incrementais, não chegando às proximidades da região de maior adensamento populacional do município de Rio Acima.

### 8.6.1 Mapeamento da inundação

O mapeamento dos parâmetros de inundação constitui o principal produto dos estudos de ruptura hipotética por representar de maneira sintética e espacialmente distribuída o potencial de dano e ameaça decorrente da propagação da onda de ruptura.

Nesse contexto, dentre uma série de opções de mapeamento da informação, optou-se pela compilação do mapeamento da inundação máxima adotando-se as escalas entre 1:6.000 e 1:7.000 para ambos os cenários de ruptura (dia chuvoso e dia seco).

O mapeamento da inundação máxima trata-se de um produto onde são apresentados os limites e as profundidades máximas do potencial de inundação, além do mapa das velocidades máximas, risco hidrodinâmico e tempo de chegada. Os referidos mapas estão apresentados nos mapas do Anexo I.



	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

A diferença na extensão da propagação e inundação potencial entre os cenários é resultante da diferença entre os parâmetros reológicos (concentrações volumétricas/quantidade de água nos rejeitos e maciço) e a vazão de base já presente no cenário de dia chuvoso (maior volume no modelo). Em ambos os cenários há a deposição completa da massa de rejeitos no trecho inicial do Rio das Velhas. Para o dia chuvoso, apesar da extensão da inundação ser superior ao do dia seco, há somente um pequeno incremento de impactos no município de Rio Acima.

Para ambos os cenários, considera-se o mapeamento da inundação potencial suficiente, em vista da deposição completa dos rejeitos na calha do Rio das Velhas (critério de parada). Mesmo que as cheias no Rio das Velhas fossem diferentes (Tempo de Retorno maiores ou menores), não é esperado mudança no potencial incremental da inundação para o dia chuvoso.

Segundo informações fornecidas pela Minérios Nacional, no âmbito do PAEBM, um resumo dos potenciais impactos é apresentado abaixo:

Em relação a área atingida, a Minérios Nacional relata em seu documento de PAEBM<sup>5</sup> (Doc. 14):

- Os 2 sítios que se encontravam na região de ZAS foram evacuados.
- A empresa Fontes realizou em 2020 um cadastro parcial da região das ZSS no qual visitadas 44 propriedades, totalizando 74 pontos e 126 moradores. Dentre eles, foram identificados um total de 18 moradores com mobilidade reduzida (recém-nascido, criança, idoso, grávidas, deficientes físicos e intelectuais).
- Na área de estudo compreendida pela mancha nota-se a existência de infraestruturas de mobilidade tais como ferrovias, e rodovias municipais, incluindo a MG-030 (estrada real).
- Não existem presídios, subestações de energia, estações de tratamento de água ou de esgoto atingidas pela mancha;

---

<sup>5</sup> A responsabilidade pelo mapeamento e fornecimento das informações relacionadas aos potenciais impactos é estritamente da Minérios Nacional, não fazendo parte do escopo do presente estudo.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

- A região que sofrerá impacto direto, no caso de um rompimento das barragens pertencentes ao Complexo de Fernandinho, é conhecida como “Fazenda Velha”, que se trata de um talvegue com curso d’água que recebe o nome de Córrego Fazenda Velha.
- Foram identificados postos combustíveis na região afetada pela mancha, sendo eles: Posto Petrobras (Carmyanas); Posto Mac Preto (Posto da Jannete).
- No caso de uma ruptura hipotética das barragens B2A e B2 não foi identificado nenhum sítio arqueológico na região da mancha. Na região de Rio Acima/MG existe o sítio arqueológico Vale da Mata, no entanto localiza-se externo a área afetada.
- Encontram-se na região da mancha (ZSS): a Prefeitura Municipal de Rio Acima, a Igreja São Judas Tadeu, a Paróquia Santo Antônio, a Estação de Trem de Rio Acima e o Terminal Rodoviário.
- Não foram identificados na região da mancha sítios espeleológicos;
- Não foram identificados na região da mancha povoados de comunidades indígenas ou quilombolas;
- Baseado em visitas in loco e em base de dados geoespaciais foi identificado que as barragens do Complexo de Fernandinho estão inseridas no bioma Mata Atlântica e a sua jusante, nota-se uma área preservada e de interesse ambiental (APA Estadual Sul RMBH).

A mancha em estudo não causará impactos diretos na captação de água para a cidade de Rio Acima, no entanto, o córrego Fazenda Velha e o Rio das Velhas sofreriam impacto direto, causando em partes assoreamento destes cursos hídricos e impacto na qualidade da água.

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

#### 8.6.1.1 Zona de Autossalvamento (ZAS) e Zona de Segurança Secundária (ZSS)

Com base no cenário de dia chuvoso (extremo), a delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) se baseou no alcance da onda de inundação conforme os 30 minutos de avanço (13 km). As demais regiões mapeadas, aproximados 11 km que incluem a região urbana e ribeirinha de Rio Acima, fazem parte da Zona de Segurança Secundária (ZSS).

## 9 Conclusões e Considerações Finais

Os estudos de ruptura hipotética desenvolvidos para as Barragens B2 e B2A foram satisfatórios para apresentarem o potencial deslocamento da massa de rejeitos e água, dentro de uma faixa de risco considerada aceitável, subsidiadas principalmente pela reologia do material, obtida nos ensaios de laboratório (reológicos) das amostras do rejeito da Barragem B2 (Doc. 6), que possui um papel preponderante na limitação do avanço da massa de rejeitos para jusante.

A ruptura instantânea aliada a utilização de um volume a partir da própria configuração 3D do maciço e reservatório traz mais segurança na representação da dinâmica do escoamento. Foi possível estimar os resultados obtidos de profundidade, velocidades, risco hidrodinâmico e tempos de chegada no vale a jusante, objetos dessa avaliação.

As extensões das inundações para os cenários se diferem principalmente pelo maior volume de água presente no rejeito e nos reservatórios para o cenário de dia chuvoso, além da cheia natural do vale de jusante. Em ambos os cenários os rejeitos se depositam por completo na calha do Córrego Fazenda Velha e Rio das Velhas, porém, no cenário de dia chuvoso, um pequeno incremento na inundação é observado no município de Rio Acima.

Como resultado principal é importante enfatizar que essa análise proposta tem como função **estimar** um alcance de inundação numa eventual ruptura das Barragens B2 e B2A, uma vez que os parâmetros da inundação potencial estão condicionados a

	TÍTULO	Nº Brazil Hydro
	Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

uma hipótese de ruptura da barragem e mobilização dos rejeitos, regida sob premissas conservadoras (Tabela 8.10).

Deve-se prezar pelo bom senso de que as incertezas associadas a esse tipo de estudo (premissas, modelos digitais de terreno, parâmetros reológicos, modelos numéricos) devem ser guias para as tomadas de decisão, e os resultados nunca devem ser aceitos como absolutos. Sendo assim, é necessário avaliar a questão do risco e probabilidades de ocorrência de cada cenário para definição de planejamento de ações emergenciais e de remediação.

Cabe ainda destacar que quaisquer alterações nas premissas ou na base de dados iniciais podem invalidar os resultados apresentados e demandar novas avaliações e revisões nos estudos.

## 10 Referências Consultadas

Chow, V. 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill. New York, 1959, 680 p.

HYDRONIA, 2021. *RiverFlow2D, Two-Dimensional River Dynamics Model*. Reference Manual. Pembroke Pines, Hydronia LLC, 2021, 310p.

FEMA, 2013. *Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures* – FEMA, Julho, 2013.

CDA, 2019. *Technical Bulletin: Tailings Dam Breach Analyses (IN DRAFT)* – CDA (Canadian Dam Association). Fevereiro, 2019.

ANA, 2017. Volume IV “*Guia de Orientação e Formulários dos Planos de Ação de Emergência*” do Manual do Empreendedor. Agência Nacional de águas – 2017.

	<b>TÍTULO</b> Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem - Barragens B2 e B2A	Nº Brazil Hydro
		CSN-F3-RL-003-02
		Nº CSN Mineração
		MIPE_H_DAM_B2_B2A_RT01_12_2023_2

## Anexo I

Os mapas relativos à envoltória da inundação máxima, máximas profundidades, máximas velocidades, risco hidrodinâmico e tempo de chegada para os cenários de dia chuvoso e dia seco estão apresentados conforme numeração a seguir:

Documento/Numeração	Mapas
CSN-F3-DE-001-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE01_12_2023_1	Mapa da Envoltória Máxima de Inundação Cenário Dia Chuvoso
CSN-F3-DE-002-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE02_12_2023_1	Mapa de Profundidades Máximas Cenário Dia Chuvoso
CSN-F3-DE-003-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE03_12_2023_1	Mapa de Velocidades Máximas Cenário Dia Chuvoso
CSN-F3-DE-004-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE04_12_2023_1	Mapa do Risco Hidrodinâmico Cenário Dia Chuvoso
CSN-F3-DE-005-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE05_12_2023_1	Mapa do Tempo de Chegada Cenário Dia Chuvoso
CSN-F3-DE-006-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE06_12_2023_1	Mapa da Envoltória Máxima de Inundação Cenário Dia Seco
CSN-F3-DE-007-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE07_12_2023_1	Mapa de Profundidades Máximas Cenário Dia Seco
CSN-F3-DE-008-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE08_12_2023_1	Mapa de Velocidades Máximas Cenário Dia Seco
CSN-F3-DE-009-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE09_12_2023_1	Mapa do Risco Hidrodinâmico Cenário Dia Seco
CSN-F3-DE-010-01 MIPE_H_DAM_B2_B2A_DE10_12_2023_1	Mapa do Tempo de Chegada Cenário Dia Seco