

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* SANTA LUZIA

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Cesar Marcolino Santana Junior

**MAPEAMENTO DA INUNDAÇÃO CAUSADA PELA RUPTURA DA BARRAGEM
LAGOA DO NADO (MG) VIA MODELAGEM HIDRÁULICA 2D**

Santa Luzia

2026

CESAR MARCOLINO SANTANA JUNIOR

**MAPEAMENTO DA INUNDAÇÃO CAUSADA PELA RUPTURA DA BARRAGEM
LAGOA DO NADO (MG) VIA MODELAGEM HIDRÁULICA 2D**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Santa Luzia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Verônica Bernardes de Souza Léo

Santa Luzia

2026

Cesar Marcolino Santana Junior

**MAPEAMENTO DA INUNDAÇÃO CAUSADA PELA RUPTURA DA BARRAGEM
LAGOA DO NADO (MG) VIA MODELAGEM HIDRÁULICA 2D**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Civil apresentado ao Instituto
Federal de Minas Gerais - *Campus* Santa Luzia
como requisito parcial para a obtenção do título
de Engenheiro Civil.

Aprovado em: ___/___/_____ pela banca examinadora

Prof.^a Dra.^a. Verônica Bernardes de Souza Léo (Orientadora) – IFMG Santa Luzia

Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda – IFMG Santa Luzia

Eng.^a Deborah Cardoso da Cruz – Enemax Engenharia e Consultoria

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S232m	<p>Santana Júnior, Cesar Marcolino.</p> <p>Mapeamento da inundação causada pela ruptura da Barragem Lagoa do Nado (MG) via modelagem hidráulica 2D. / Cesar Marcolino Santana Júnior. - 2026.</p> <p>78f. : il.</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Santa Luzia, 2026.</p> <p>Orientador: Profª Drª. Verônica Bernardes de Souza Léo.</p> <p>1. rompimento de barragens. 2. mapeamento de inundações. 3. modelagem hidráulica. I. Léo, Verônica Bernardes de Souza (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Santa Luzia, MG. III. Título.</p> <p>CDU: 627.8:532.5</p>
-------	--

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os professores do IFMG Campus Santa Luzia pelo conhecimento passado durante às aulas, pela dedicação e carinho para com os alunos. Em especial a Prof^a. Verônica Bernardes, por ter aceito me orientar durante esta jornada, e Prof. Daniel Augusto de Miranda por ter despertado em mim o interesse pela a área de recursos hídricos e segurança de barragens.

À Equipe Enemax Engenharia: Mariana e Arielle. Por todo tempo dedicado e paciência para mostrar os segredos da modelagem hidrodinâmica!

À minha família por todo o incentivo aos estudos e condições para que eu pudesse chegar aqui hoje. Faço questão de citar todos para registrar a importância e enorme gratidão que sinto: Nilza, Afonso (uma pena não estar mais aqui para presenciar essa conquista), Vilma, Maria Cecília e Paulo Henrique. Meu muitíssimo obrigado, pessoal!

E a minha namorada, companheira e melhor amiga, Isabela. Por todo companheirismo, amor, compreensão e apoio incondicional durante essa minha trajetória. Com você tudo se torna mais fácil.

RESUMO

As barragens são estruturas que permitem o acúmulo de água, gerando reservatórios utilizados para diversas finalidades, tais como abastecimento, controle de enchentes, irrigação e geração de energia elétrica. Casos de rompimento são relatados desde a antiguidade, gerando riscos imensuráveis ao meio ambiente e às sociedades estabelecidas a jusante do barramento. Graves acidentes envolvendo o colapso de tais estruturas foram fundamentais para que alguns países desenvolvessem as primeiras legislações para regulamentar e fiscalizar, além de impor padrões de segurança a serem seguidos, ou aprimorar as iniciativas já existentes nesse sentido. No Brasil, o Plano de Ação de Emergência (PAE) é um dos componentes obrigatórios do Plano de Segurança de Barragens (PSB), principal instrumento de gestão da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). A principal ferramenta para o desenvolvimento do PAE é o estudo de rompimento hipotético de barragem, ou *Dam Break*, desenvolvido por meio de modelos matemáticos e simulações que fornecem a mancha de inundação a jusante e diversos dados hidráulicos. Tais dados são importantes para a avaliação de diferentes cenários de ruptura, como por exemplo, modos de falhas distintos. Esse estudo também pode ser aplicado a estruturas onde o rompimento já ocorreu, com o intuito de trabalhar com dados de entrada e condições de contorno consolidados, com a finalidade de análise da extensão dos impactos gerados. Neste cenário, o presente estudo objetiva analisar a ruptura da Barragem Parque Lagoa do Nado, ocorrida em novembro de 2024 em Belo Horizonte, Minas Gerais, por meio de modelagem 2D. Para isso, foram analisados os resultados obtidos com a simulação nos *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS, utilizando o galgamento como modo de falha e características da brecha de ruptura próximas às da brecha real. Dessa forma, foi possível observar o escoamento da onda de cheia nas regiões a jusante do barramento. Os resultados indicam 10,23 ha de área inundada ao longo de quase 3 km de extensão, atingindo cerca de 50 edificações, além de gerar inundações consideráveis em vias importantes do município de Belo Horizonte.

Palavras-chave: ruptura de barragem, inundação, HEC-RAS.

ABSTRACT

Dams are structures designed to accumulate water, creating reservoirs used for various purposes such as water supply, flood control, irrigation, and power generation. Cases of dam failure have been reported since antiquity, causing immeasurable risks to the environment and to societies established downstream of the structure. It was following severe accidents involving the collapse of such structures that countries developed the first legislations to regulate and inspect them, as well as to impose safety standards. In Brazil, the Emergency Action Plan (PAE) is a mandatory component of the Dam Safety Plan (PSB), which is the main management instrument of the National Policy on Dam Safety (PNSB). The primary tool for developing the PAE is the *dam break* study, performed through mathematical models and simulations that provide the downstream flood map and various hydraulic data. These data support the definition of meeting points and escape routes for people in areas potentially affected by the flood wave. This study can also be applied to structures where a failure has already occurred, with the aim of working with consolidated input data and boundary conditions, moving away from hypothetical scenarios and generating results closer to reality, which makes it an excellent option for analyzing flood wave impacts. In this context, the present study aims to analyze the failure of the Lagoa do Nado Park Dam, which occurred in November 2024 in Belo Horizonte, Minas Gerais, through 2D modeling. For this purpose, results obtained from simulations in HEC-HMS and HEC-RAS *software* were analyzed, using overtopping as the failure mode and breach characteristics close to those of the actual event. Thus, it was possible to observe the flow of the flood wave in the downstream regions. The results indicate 10.23 ha of flooded area over a length of nearly 3 km, affecting about 50 buildings and causing significant flooding on major roads in the city of Belo Horizonte.

Keywords: *dam break*; hypothetical *dam break*; HEC-RAS.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivo Geral.....	11
2.2. Objetivos Específicos.....	11
3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	12
4. REFERENCIAL TEÓRICO	13
4.1 Definição de barragem	13
4.1.1 Barragem de concreto.....	13
4.1.1 Barragem de aterro.....	14
4.2 O histórico do rompimento de barragens	15
4.3 Principais causas do rompimento de barragem	16
4.3.1 Galgamento	17
4.3.2 Erosão Interna	18
4.3.3 Deslizamento.....	19
4.3.4 Tombamento	19
4.4 Normativas de segurança de barragens	20
4.4.1 A Legislação Brasileira	21
4.5 Análise de ruptura de barragem	22
4.5.1 Parâmetros da brecha de ruptura	22
4.5.2 Hidrograma de ruptura	24
4.5.3 Propagação do hidrograma de ruptura.....	26
4.5.3.1 Modelos hidrodinâmicos	27
4.5.3.2 HEC-RAS.....	27
4.5.3.3 HEC-HMS.....	29
4.6 Parâmetros Físicos e Geoespaciais.....	30
4.6.1 Topografia do vale a jusante	30
4.6.2 Coeficiente de rugosidade de Manning.....	32
5. METODOLOGIA	34
5.1 Caracterização da área de estudo	34
5.1.1 Ruptura da Barragem	36
5.2 Projeção e bases topográficas.....	39
5.3 Elaboração da geometria	40

5.4 Definição da brecha e do hidrograma de ruptura	41
5.4.1 Hidrograma de ruptura	43
5.5 Condições de Contorno	45
5.6 Uso e ocupação do solo.....	46
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
6.1 Brecha de ruptura e hidrograma de ruptura.....	53
6.2 Seção 1	53
6.3 Seção 2	56
6.4 Seção 3	59
6.5 Seção 4	61
6.6 Seção 5	64
6.7 Seção 6	66
6.8 Resumo das seções	69
6.9 Análise dos resultados.....	69
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas que desempenham importantes funções para as sociedades desde a antiguidade. Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens – ICOLD (2020), os primeiros barramentos foram construídos com a única função de abastecimento de água ou irrigação. Entretanto, com o desenvolvimento das civilizações, surgiram demandas cada vez maiores de abastecimento de água, controle de enchentes, irrigação, navegação, controle de sedimentação, energia hidrelétrica, lazer e recreação.

Devido à diversificação de seu relevo e de diversos cursos d'água, o Brasil possui um grande número de barragens em seu território. De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB (2011), a barragem mais antiga que se tem notícia em solo brasileiro foi construída onde hoje encontra-se a área urbana do Recife (PE), possivelmente no final do século XVI, conhecida presentemente como Açude dos Apipucos.

A Grande Seca do Nordeste, em 1877, foi um marco importante para a construção de centenas dessas estruturas para combate à seca na região, durante o século XX. Já na região Sudeste, as construções das barragens deram-se por razão da demanda energética, sendo que, em 1889, em Juiz de Fora / MG, foi construída a primeira usina hidrelétrica do país, denominada Usina Marmelos Zero. Na década de 50 e 60 diversos estudos foram financiados pelo governo, visto à percepção de um grande potencial hidroenergético da região. Diante do sucesso da implantação das usinas, nos anos seguintes, os mesmos estudos foram realizados nas regiões Sul, Nordeste e Norte. Foram construídas mais de sessenta grandes barragens hidrelétricas, que multiplicaram em mais de sete vezes a capacidade instalada, que passou de 4.894 MW em 1964 a 37.437 MW em 1985 (Capellini, 2022).

A rápida expansão e construção dessas estruturas por todo território nacional foi responsável pelo intenso desenvolvimento industrial e crescimento das cidades, que se dava próximo aos reservatórios e muitas vezes a jusante dos mesmos. Tais situações, acrescidas à ausência de uma legislação consolidada que guiasse a operação e que exigisse fiscalizações, aumentava o risco de eventos catastróficos frente aos de acidentes e incidentes provenientes dos colapsos de barragens (Silva *et al.*, 2021).

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, os rompimentos das barragens Euclides da Cunha em 1977 (SP), Barragem de Rejeito de Cataguases em 2003 (MG), Barragem de Camará em 2004 (PB), PCH Apertadinho em 2008 (RO), PCH Espora em 2008 (GO) e Barragem Algodões em 2009 (PI) impulsionaram a promulgação da Lei Federal

nº 12.334/2010 (posteriormente atualizada pela Lei 14.066/2020), conhecida como Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Essa legislação estabeleceu padrões de segurança, mitigando riscos de acidentes e seus respectivos impactos para barragens com altura mínima de 15 metros ou capacidade superior a 3 milhões de metros cúbicos. Uma das diretrizes da Lei, no intuito de minimizar os riscos e consequências geradas por uma ruptura, é a elaboração de um Plano de Segurança de Barragens (PSB) e um Plano de Ação de Emergência (PAE) (Kipper, 2022).

Para elaboração do PAE faz-se necessário o conhecimento de alguns parâmetros específicos do dano causado a jusante em um possível rompimento, logo é fundamental que sejam realizados estudos de rompimento hipotético, ou *dam break* (Ferla, 2018). Segundo Veról *et al.* (2013) *apud* Lopes (2015), a utilização de modelagem hidrodinâmica permite delimitar as áreas potencialmente afetadas, pois realizam simulação de cenários de ruptura, buscando a melhor representação do comportamento do fluxo da água.

Apesar das legislações vigentes, casos de rompimento continuam ocorrendo, como por exemplo, a Barragem Parque Lagoa do Nado, localizada na Região da Pampulha, em Belo Horizonte - Minas Gerais, que rompeu em novembro de 2024 após um galgamento, gerando prejuízos ambientais e impactando diretamente a fauna e flora do parque. De acordo com Xiong (2011), o rompimento de uma barragem é um processo complexo e abrangente, e os mecanismos reais de falha não são totalmente compreendidos. Nem os modelos físicos atuais, nem os modelos empíricos conseguem explicar completamente os mecanismos e impactos do rompimento, mas conseguem auxiliar em diversas frentes de análises.

Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso tem como intuito analisar os impactos causados pela onda cheia nas regiões a jusante, através de uma modelagem hidráulica, tendo como base o estudo de caso a Barragem da Lagoa do Nado, utilizando dados disponibilizados acerca do rompimento para gerar resultados mais consolidados.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar a região a jusante da Barragem do Parque Lagoa do Nado (Belo Horizonte – Minas Gerais) na ocasião do rompimento desta por galgamento ocorrido em novembro de 2024, com base em um modelo hidráulico obtido com a utilização do programa computacional HEC-RAS.

2.2. Objetivos Específicos

- Obter o hidrograma e a brecha de ruptura para o modo de falha ocorrido;
- Gerar o mapa de inundação para a região atingida;
- Expor e analisar os resultados obtidos pelo *software*, sendo: tempo de chegada da onda de cheia, velocidade e profundidade da lâmina d'água em determinadas seções.

3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Segundo Tercini (2020) o estudo de *Dam Break* é uma etapa fundamental no desenvolvimento da área de segurança de barragens, devido aos resultados gerados embasarem a elaboração dos PAE's, permitindo a geração do mapa de inundação e definição das áreas de risco. Entretanto, para uma barragem onde já ocorreu o rompimento, o *Dam Break* se torna uma ferramenta de análise, permitindo a avaliação e certas comparações com o ocorrido. Tal fato gera modelos mais próximos ao rompimento, pois será desenvolvido com uma brecha de ruptura, e conseqüentemente com um hidrograma de ruptura, com características mais semelhantes possíveis à realidade, deixando de lado o carácter hipotético, que geralmente trabalha com o pior cenário para as simulações, e gerando resultados mais concretos.

Atualmente, o HEC-RAS é uma das principais ferramentas utilizados para o desenvolvimento de um *Dam Break*, sua ampla utilização pode ter relação com o fato de ser capaz de gerar simulações de ruptura de escoamentos permanente e não-permanente (Lauriano *et al.*, 2009). O *software* permite a caracterização do barramento, das estruturas extravasoras, do escoamento e das áreas montante e jusante, além de ser possível definir todos os parâmetros da brecha através de equações consolidados. Sendo assim, a utilização e operação do *software* é de uma grande valia para obtenção de repertório técnico e colaboração com a área de segurança de barragens.

Dessa forma, o estudo de ruptura com o uso do HEC-RAS mostra-se uma ferramenta importante para compreender melhor o comportamento de barragens em situações de ruptura. Com base em parâmetros reais, é possível gerar simulações mais precisas e próximas do evento ocorrido, tornando o estudo mais confiável. Assim, o estudo não apenas reforça a relevância do *Dam Break* como ferramenta de análise, mas também evidencia seu papel essencial no aperfeiçoamento das práticas de gestão de risco e mitigação de desastres.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Definição de barragem

É possível encontrar algumas definições para o conceito de barragem ou barramento em diferentes literaturas. Baptista e Lara (2001) relatam que barragens são obras hidráulicas destinadas a realizar o represamento de um curso d'água, com intuito de uma utilização mais racional dos recursos hídricos.

Segundo a Lei Federal nº 14.066/2020 (Brasil, 2020), barragem é qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas entre líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas. Estas são divididas em dois tipos: barragens de concreto e de aterro.

4.1.1 Barragem de concreto

As barragens de concreto são construídas com blocos ou maciços de concreto, podendo assumir diferentes formas, como barragens gravidade, em arco ou contraforte. São frequentemente empregadas em locais onde a fundação é resistente e onde há restrições quanto ao espaço ou à segurança. De acordo com Reis *et al.* (2010), suas características incluem:

- Alta resistência à pressão hidrostática, sendo ideais para grandes alturas de queda;
- Maior estanqueidade natural, reduzindo problemas com infiltrações;
- Menor deformabilidade, o que exige fundações mais rígidas e bem preparadas;
- Custo mais elevado, tanto em materiais quanto em execução;
- Possibilidade de instalação de equipamentos hidromecânicos com mais facilidade (p.e. descarregadores de fundo, vertedouros controlados).

Um exemplo desse tipo de barragem é a da Usina Hidrelétrica de Funil, Figura 1, considerada como uma barragem tipo abóboda de curvatura dupla. Localizada no rio Paraíba do Sul, no local conhecido como “Salto do Funil”, em Resende, no Estado do Rio de Janeiro (Furnas, 2026).

Figura 1 – UHE Funil



Fonte: Beira-Rio (2021)

4.1.1 Barragem de aterro

Barragens de aterro são estruturas constituídas predominantemente por materiais terrosos, como argila, silte, areia e cascalho, compactados em camadas sucessivas. Esse tipo de barragem é amplamente utilizado devido à disponibilidade local de materiais e à facilidade de construção. Segundo Vasconcelos (2006), as barragens de terra apresentam as seguintes características principais:

- Alta flexibilidade estrutural, o que as torna mais resistentes a assentamentos e recalques diferenciais;
- Custo geralmente mais baixo em comparação com estruturas de concreto;
- Requerem cuidados especiais com o controle de infiltrações, por meio de núcleos impermeáveis, filtros e drenos;
- São mais sensíveis à erosão superficial e à ação de águas pluviais, exigindo proteção adequada (como gramíneas ou enrocamentos).

Como exemplo, pode-se citar a Barragem Ribeirão da Cachoeira (BRC), de terra compactada e enrocamento na base do talude de montante. Localizada no rio Mainart, no município de Ouro Preto, estado de Minas Gerais (Maynard, 2023).

Figura 2 – CGH BRC



Fonte: Nec Energia (2025)

4.2 O histórico do rompimento de barragens

Assim como as construções das barragens, os rompimentos dessas estruturas também acontecem desde os tempos antigos. De acordo com Tschiedel (2019), a barragem de Sadd el Kafara é uma das barragens mais antigas que se tem registro (1000 a.C), sendo que, pela ausência de um vertedouro, logo após a sua conclusão, veio a romper devido à passagem da água sobre a crista da barragem (galgamento).

Segundo Balbi (2008), os países que mais se destacaram na construção de barragens também são aqueles que mais guardam experiências negativas envolvendo acidentes com colapsos. Ainda de acordo com o autor, no século XX, foram registrados cerca de 200 acidentes graves com barramento no mundo, sendo que, entre a década de 50 e 70, alguns rompimentos ganharam destaque devido ao porte e aos impactos sócio econômicos e ambientais associados. Alguns deles ocorreram: na barragem Malpasset, na França em,1959; em Vajont, na Itália em1963; em Baldwin Hills e em Teton, nos Estados Unidos, em 1951 e 1976, respectivamente.

Desde a década de 50, já foram documentados cerca de 39 casos de rompimento de barragens no Brasil (Tschiedel, 2019), evidenciando a recorrência desse tipo de desastre em escala nacional. O Quadro 1 apresenta alguns dos principais rompimentos de barragens no Brasil, distribuídos por década, a partir de 1950.

Quadro 1 – Histórico de rompimento de barragens brasileiras desde 1950

Década						
1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Pampulha	Orós	Euclides da Cunha	Boa Esperança	Macacos	Rio Verde	Itabirito
		Limoeiro	Santa Helena	Emas	Cataguases	Laranjal do Jari
		Poquim	Fernandinho		Mirai	Herculano
			Pico São Luiz		Espora	Camocim
					Apertadinho	Analandia
					Algodões	Boa Vista do Uru
					Camará	Vacaro
					Nova Lima	Coronel Sapucaia
						Zampieri
						Buritis
						Fundão
						Alta Grande
						Fazenda Felícia
						Fazenda Guavirova
						Balneário Ayrton Senna
						Rincão dos Kroeff
						Cacimba Nova
						Barreiros
						Lageado
						Brumadinho

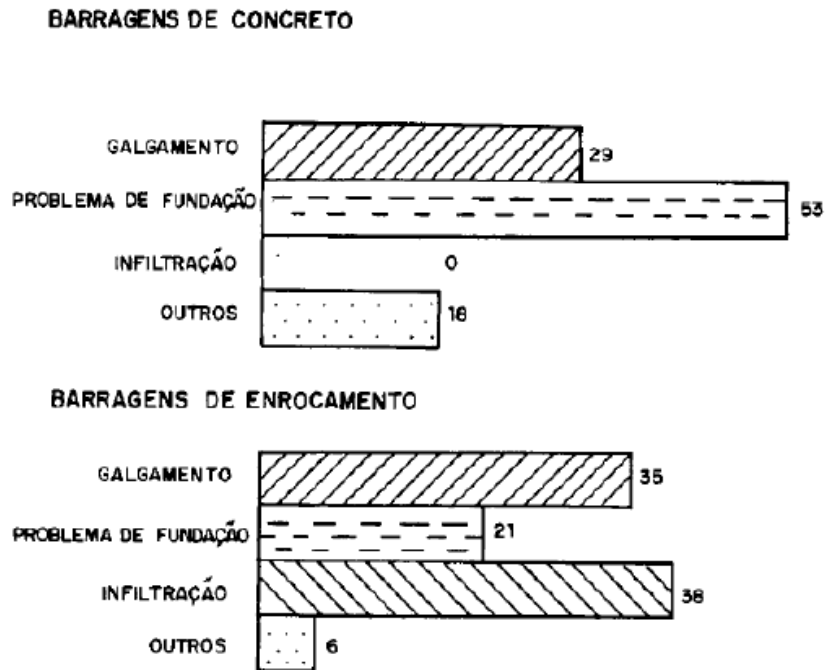
Fonte: Tschiedel *et al.* (2019)

4.3 Principais causas do rompimento de barragem

O rompimento de uma barragem geralmente está associado às falhas relacionadas ao projeto, construção e/ou operação. Segundo Tomaz (2013) *apud* Ferla (2018), entende-se por falha em uma barragem a consequência de uma operação imprópria, ou a ruptura ou colapso da estrutura, que ocasiona o escoamento espontâneo da água antes represada. De acordo com Mascarenhas (1990), a ruptura de uma barragem ocorre devido a fatores materiais, naturais ou à intervenção humana, resultando da manifestação isolada ou combinada desses elementos. Já para a ANA, o rompimento trata-se do comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo do reservatório, ocasionando o colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa.

De acordo com Collischonn (1997), é importante observar o tipo de barragem, de acordo com o material, no que se diz respeito às causas de ruptura. Segundo o autor, barragens de terra apresentam problemas relacionados a galgamento, infiltração ou erosão interna. Enquanto as barragens de concreto são sujeitas a colapsos instantâneos. Tal premissa é confirmada por Costa (1985) em sua análise frente aos casos históricos de rompimento de barragens com altura superior a 15 m, onde foi identificado que 53% das barragens de concreto romperam devido à problemas na fundação, conforme demonstrado pela Figura 3.

Figura 3 – Porcentagem dos modos de falhas em barragem com mais de 15 m



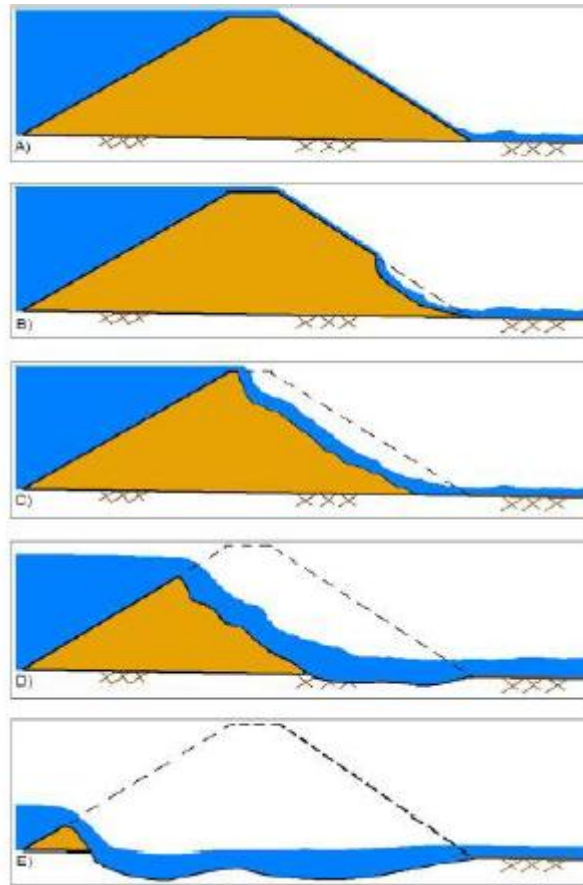
Fonte: Mascarenhas (1990) adaptado de Costa (1985) *apud* Ferla (2018)

Esse tipo de análise é extremamente relevante para as equipes responsáveis pelo projeto, execução e operação das barragens. Considerando o alto risco de rompimento associado a essas causas principais, as equipes devem adotar medidas especiais para impedir que esses fenômenos ocorram.

4.3.1 Galgamento

O galgamento, ou *overtopping*, ocorre quando os sistemas extravasores não são capazes de verter a água proveniente de cheias causadas por eventos extremos ou por ondas ocasionadas por sismos, fazendo com que ocorra o transbordamento pela crista. De acordo com Jónatas (2013), em barragens de aterro com rompimento por galgamento, o escoamento sobre o talude a jusante resulta na formação de uma brecha, causando uma erosão progressiva na região central da barragem, onde normalmente o escoamento é mais intenso, podendo levar a uma ruptura local. O autor ainda destaca que uma compactação deficiente em qualquer parte do aterro pode criar um ponto fraco, que tende a ser o núcleo inicial do desenvolvimento da brecha. A Figura 4 demonstra o processo de ruptura em uma barragem de terra por galgamento. Segundo Jansen (1983) *apud* Kiper (2022), em barragens de concreto o fenômeno pode ocasionar erosões em suas fundações, porém suportam um tempo limite da ocorrência sem romper.

Figura 4 – Evolução do processo de erosão pelo galgamento

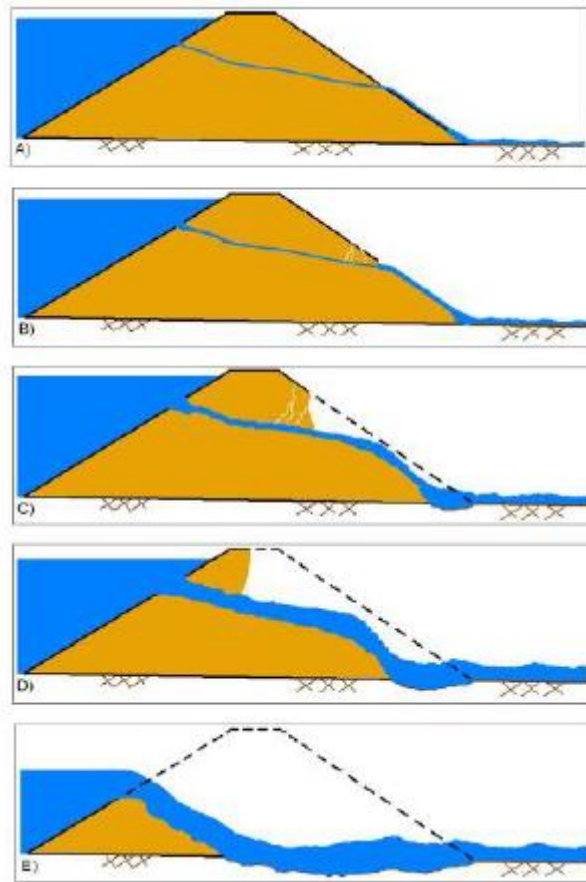


Fonte: USACE (2014) *apud* Kipper (2022).

4.3.2 Erosão Interna

Falhas por erosão interna, também conhecida mundialmente como piping, ocorrem devido à percolação da água pelo aterro ou fundação da barragem. Segundo Kipper (2022), quando os esforços da percolação da água se tornam superiores aos esforços resistentes do material da estrutura, o processo de erosão interna se inicia, resultando, futuramente, no colapso da barragem devido ao carregamento progressivo do material da barragem. Tal modo de falha também é conhecido por infiltração ou entubamento. A Figura 5 exemplifica todo o processo da erosão interna.

Figura 5 – Evolução do processo de erosão interna



Fonte: USACE (2014) *apud* Kipper (2022).

4.3.3 Deslizamento

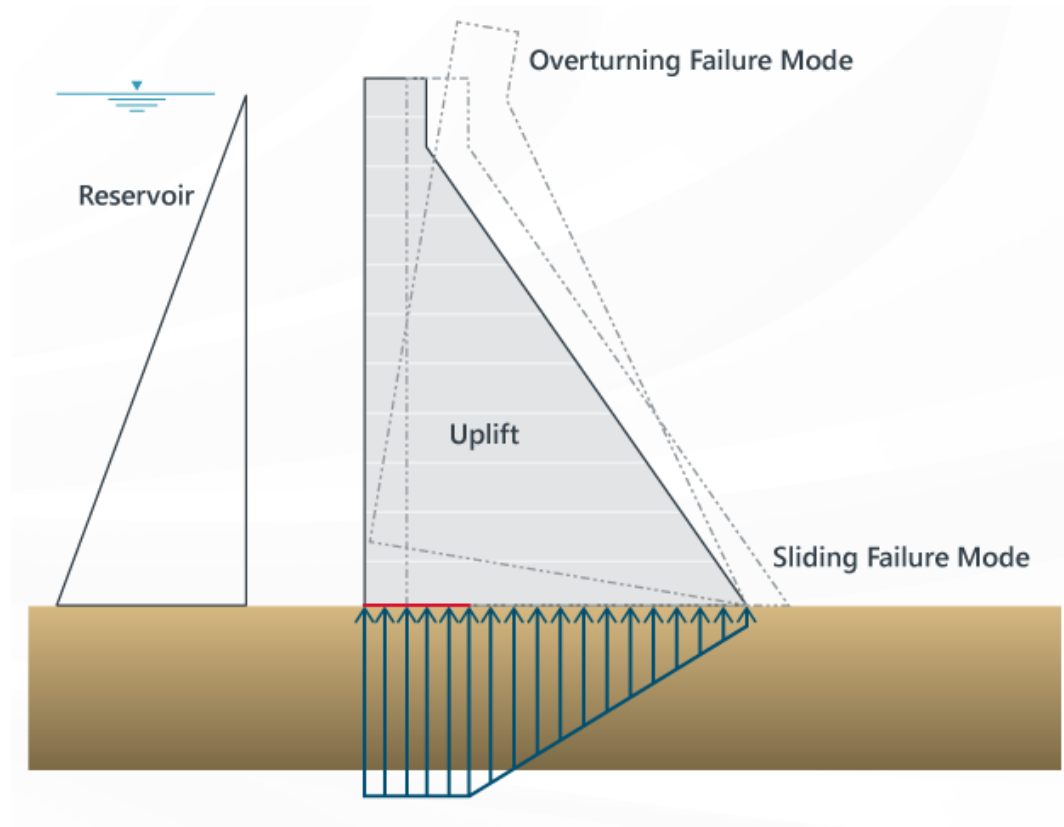
A falha por deslizamento ocorre quando há um desequilíbrio entre os esforços solicitantes e resistentes, resultando no transporte da estrutura para jusante, através de um plano de deslizamento. Para A. Atallah (2002) *apud* Jónatas (2013) a principal causa do desequilíbrio dos esforços que provoca o deslizamento da barragem pode ser a subpressão causada pela água presente na fundação em contraposição ao peso próprio da estrutura que atua como força contrária.

4.3.4 Tombamento

O tombamento (*overturning*) é um modo de falha exclusivo para as barragens de concreto. De acordo com Jónatas (2013), o fato de as barragens de terra serem construídas por camadas, impede que ela gire sobre seu próprio eixo como um todo. Por outro lado, as barragens de concreto possuem características estruturais que favorecem a ocorrência desse fenômeno, já

que sua composição oferece a rigidez necessária para que se comporte como um corpo único, conforme representado pela Figura 6.

Figura 6 – Ocorrência do Tombamento



Fonte: GFT (2023)

4.4 Normativas de segurança de barragens

De acordo com Aguiar (2014), a história mostra que somente após casos de acidentes fatais envolvendo barragens, foram desenvolvidos estudos com o objetivo de avaliar a segurança, indicar melhorias e gerenciar o risco. Segundo o autor, os transtornos poderiam ter sido evitados caso fossem formulados e seguidos plano de monitoramento das condições do barramento e planos de ação para as situações de emergência.

Alguns países foram pioneiros e elaboraram suas primeiras legislações voltadas para segurança de barragens no século passado. No Reino Unido, em 1930, o *Reservoir Safety Provision Act* (Decreto da Provisão de Segurança em Reservatórios) foi o primeiro documento legislativo, sendo que, em 1975, foi elaborado o *Reservoirs Act 1975* (Decreto sobre Reservatórios de 1975) para suprir as deficiências do primeiro decreto. Em 1978, a Austrália publicou o *Dam Safety Act 1978* (Decreto de Segurança em Barragens), complementado pelo

Dam Safety Code (Código de Segurança em Barragens) em 2000. Os Estados Unidos em 1980 estabeleceram o *Interagency Committee on Dam Safety* (ICODS) com o objetivo de implantar e manter um programa federal, políticas e guias que aumentasse a segurança de barragem. Em 1995, a Associação Canadense em Segurança de Barragens, publicou o *Dam Safety Guidelines* – Guia de Segurança em Barragem, revisada em 1999 pela Associação Canadense de Barragens. Já em Portugal, a principal legislação se deu em 1990 a partir do Decreto-Lei 11/90 que aprovou o Regulamento de Segurança de Barragem (Zuffo, 2005).

4.4.1 A Legislação Brasileira

No cenário nacional, a elaboração e publicação de uma normativa aconteceu de forma morosa, em comparação com o cenário internacional. Apenas em 2010 foi promulgada a Lei Federal 12.334, intitulada como Política Nacional de Segurança de Barragem, com intuito de regulamentar a segurança de barragens no país, sendo aplicável às estruturas destinadas à acumulação de água e resíduos perigosos. Nesta, foram impostas classificações às estruturas quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) e a Categoria de Risco (CRI) definidos pelos critérios estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Tais classificações são essenciais para a elaboração do PAE. Um dos aspectos mais importantes estabelecidos pela legislação foram os deveres atribuídos ao empreendedor, sendo esse responsável pela segurança e medidas para a sua garantia, e aos agentes fiscalizadores, sendo responsáveis pela classificação das estruturas (Aguiar, 2014).

A Lei Federal nº 12.334/2010 foi alterada pela Lei Federal nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Entre as principais modificações, houve a alteração da Política Nacional de Segurança de Barragem. Após o rompimento das barragens de Fundão e da Mina Córrego do Feijão, ocorreu a proibição por lei da construção ou do alteamento de barragens de mineração pelo método a montante, em que os diques de contenção se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado. Para a classificação da categoria de risco das barragens, a legislação inclui os parâmetros de técnicas construtivas e tempo de operação do empreendimento, além dos requisitos já estabelecidos anteriormente: especificações técnicas, condições de preservação e cumprimento do Plano de Segurança de Barragem (PSB). O escopo mínimo do PSB foi ampliado com novos critérios que passam a ser obrigatórios mesmo para barragens cujo PAE não era exigido antes. Além disso, o PAE torna-se obrigatório para todas as barragens: com médio e elevado DPA, identificadas como de alto risco, conforme a avaliação do órgão fiscalizador, e para todas as barragens destinadas ao armazenamento de rejeitos da

mineração, independentemente da classificação quanto ao DPA e ao risco. O PAE também teve acréscimos nas obrigações do responsável pelo empreendimento.

As diretrizes estabelecidas pela legislação foram de fato importantes para garantir e aumentar a segurança das barragens. Entretanto, segundo o SNISB (2025), há 15.515 estruturas não classificadas quanto ao DPA e 16.711 quanto ao CRI no Brasil, evidenciando um longo caminho a ser percorrido para potencializar a segurança perante a essas estruturas.

4.5 Análise de ruptura de barragem

De acordo com Ferla (2018), o rompimento de barragens e respectivo impacto causado a jusante está relacionado a uma série de fatores determinísticos. Dentre eles podem-se destacar o tipo de barragem, as causas da ruptura, os mecanismos de formação da brecha de ruptura, a estimativa da vazão de pico do acidente, a determinação do hidrograma de ruptura, a propagação da onda de ruptura e respectiva estimativa da área de inundação.

Conforme mencionado por Melo (2015) *apud* Ferla (2018), as análises de rompimento de barragens, seguem, resumidamente, o estudo e as considerações de alguns componentes principais, sendo, a simulação da forma da falha da barragem, a geração de um hidrograma de ruptura na seção da estrutura e por fim, a propagação deste hidrograma pelo vale a jusante.

4.5.1 Parâmetros da brecha de ruptura

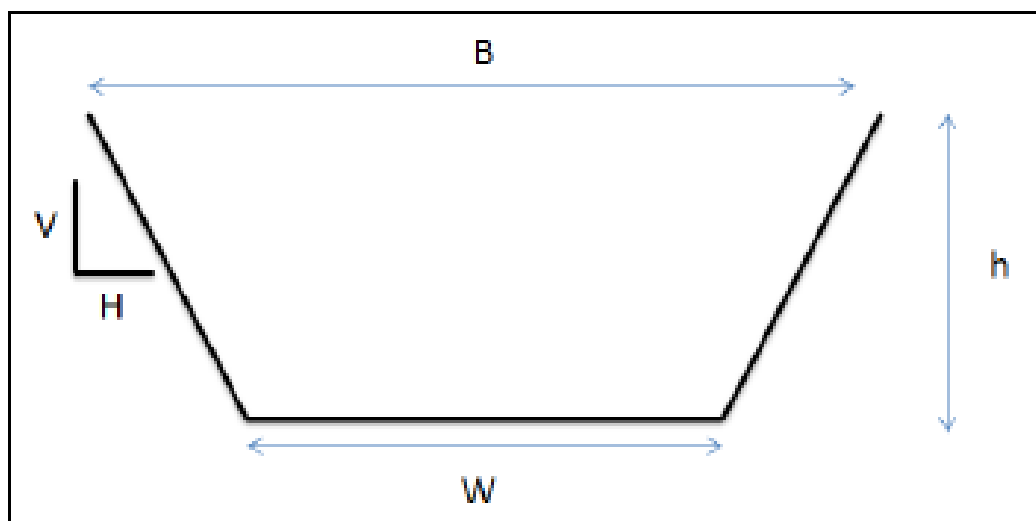
A brecha de ruptura é a abertura formada no barramento, ocasionada pela falha da barragem, por onde há o escoamento da água do reservatório, podendo ser alargada ou aprofundada conforme o fluxo de água (Collischonn e Tucci, 1997). De acordo com Gomes *et al.* (2015), em barragens de terra, a forma final da brecha de ruptura normalmente é similar a um trapézio, onde o seu tamanho é definido pela largura de sua base, seu posicionamento em relação ao corpo da barragem e a inclinação dos taludes laterais. Segundo o autor, os principais parâmetros geométricos e temporais que definem a geometria da brecha de ruptura são:

- a) Profundidade da brecha: distância vertical entre a base inferior da brecha após sua completa formação e a crista da barragem;
- b) Largura da brecha: largura final da base inferior da brecha posterior a sua completa formação;
- c) Inclinação dos taludes laterais da brecha: caracterizam e descrevem a forma de abertura da brecha;

- d) Tempo de iniciação da brecha: intervalo de tempo que começa a ter os primeiros indícios de fluxo através do maciço. O mesmo termina quando se inicia o tempo de formação da brecha de ruptura final;
- e) Tempo de formação da brecha de ruptura final ou tempo de falha: intervalo de tempo onde surgem os indícios de formação de uma brecha até a formação total da brecha de ruptura.

Os parâmetros mencionados pelos itens a, b e c estão representados abaixo pela Figura 7.

Figura 7 – Parâmetros Geométricos da Brecha de Ruptura



Fonte: Lara (2016)

A abertura da brecha desempenha um papel fundamental na análise de rompimentos de barragens, uma vez que define o hidrograma de ruptura responsável por determinar a extensão dos danos ao longo do vale a jusante. De modo geral, brechas mais largas e formadas em menor intervalo de tempo resultam em eventos de inundação mais intensos e severos (Froehlich, 2008).

Diversos autores desenvolveram métodos para determinação de parâmetros de formação de brecha. O Quadro 2 a seguir apresenta um breve resumo dos estudos apresentados por eles.

Quadro 2 – Resumo de Estudos Consolidados de Parâmetros de Brechas

Autores	Barragens Estudadas	Resultados Obtidos
MacDonald <i>et al.</i> (1984)	42 casos de ruptura de barragens de terra e enrocamento.	Desenvolveram correlações empíricas entre volume erodido, material da barragem e altura da brecha. Concluíram que o volume erodido é proporcional à

		energia disponível da água e às propriedades do material da barragem.
Von Thun e Gillette (1990)	19 barragens de terra e enrocamento	Propuseram fórmulas simplificadas baseadas em parâmetros geométricos e no volume do reservatório. Classificaram as brechas em função do tipo de material e do volume de armazenamento, indicando tempos típicos de formação e larguras médias de brecha.
Froehlich (1995)	22 rupturas de barragens de terra (com e sem vertedouro)	Criou equações empíricas para largura e tempo de formação da brecha em função da altura da barragem e do volume do reservatório. Considerado um dos modelos mais amplamente utilizados pela sua simplicidade e boa correlação com dados reais.
Froehlich (2008)	63 casos atualizados (barragens de terra e enrocamento)	Revisou seu modelo de 1995 com um banco de dados ampliado e calibrou novas equações. Aumentou a precisão da previsão da largura final da brecha, incorporando o tipo de material e o modo de falha.
Xu e Zhang (2009)	87 casos internacionais de rupturas	Propuseram novas relações empíricas com base em regressão múltipla, incluindo variáveis como tipo de material, energia hidráulica e volume do reservatório. Indicaram que fatores de resistência do material têm papel mais relevante do que se supunha.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

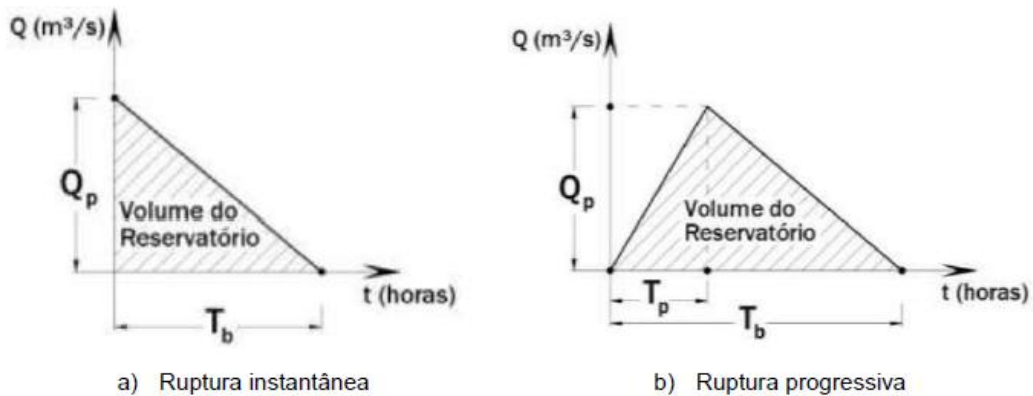
4.5.2 Hidrograma de ruptura

Para ser possível simular o evento de ruptura de uma barragem e, em seguida, elaborar o mapa de inundação, é preciso determinar o hidrograma defluente do reservatório na ruptura. Para isso, foram propostos métodos para determinação dos hidrogramas em função da vazão de pico, tempo de formação da brecha e do volume do reservatório (Ferla, 2018).

De acordo com Mascarenhas (1990), as principais características de um hidrograma de ruptura residem na rápida ascensão até um valor elevado na descarga líquida e na sucessiva depleção lenta até que valores reduzidos na descarga sejam alcançados. O autor afirma que essas características apresentam comportamentos diferentes quanto ao tipo de ruptura,

parâmetros relacionados a brecha, tipo de barragem e material utilizado para a construção do núcleo. A Figura 8 representa o método proposto por Mascarenhas, denominado hidrograma triangular simplificado, onde é possível comparar o comportamento de uma ruptura instantânea e de uma ruptura progressiva.

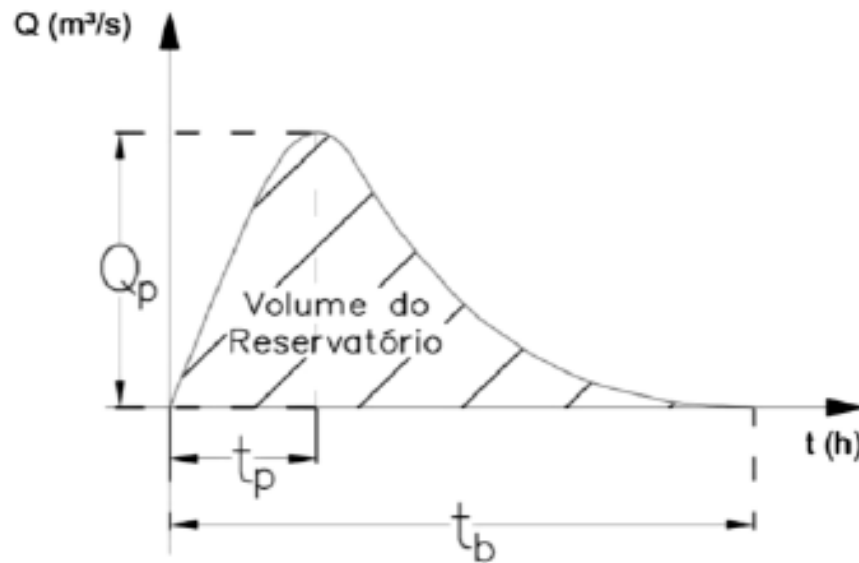
Figura 8 – Representação do hidrograma proposto por Mascarenhas



Fonte: Mascarenhas (1990) adaptado de Brasil (2005) *apud* Ferla (2018).

Entretanto, de acordo com Faria *et al.* (2017), o Hidrograma com Decaimento Parabólico, introduzido por Barfield *et al.* (1990), representa o tempo de deplecionamento de modo mais gradual que o triangular, sendo mais condizente com ocorrências de rupturas em barragens de terra. Ainda segundo o autor, este hidrograma representa de forma mais próxima da realidade o fenômeno de formação de brecha. Tais características podem ser notadas pela Figura 9.

Figura 9 – Representação do hidrograma de decaimento parabólico



Fonte: Faria *et al.* (2017)

4.5.3 Propagação do hidrograma de ruptura

Após estabelecido o hidrograma de ruptura da barragem pode-se iniciar o processo de estimativa da propagação do mesmo pelo vale a jusante do barramento. O amortecimento do hidrograma ocorre, com maior ou menor intensidade, em razão, especialmente, das características topográficas das regiões a jusante da barragem e das interações dinâmicas do escoamento (Ferla, 2018).

O intuito de se utilizar um modelo hidrodinâmico de propagação de um hidrograma de ruptura é simular o movimento da onda de cheia ao longo do vale a jusante da barragem. As informações principais necessárias em qualquer ponto de interesse na área de inundação são (Morris, 2000 *apud* Lauriano, 2009):

- a) O tempo de chegada da onda de ruptura;
- b) O tempo de chegada do nível de água máximo atingido;
- c) As profundidades e velocidades da onda de ruptura, para diferentes seções de interesse do vale a jusante;
- d) A duração da inundação;

Atualmente, métodos e *softwares* auxiliam na análise de ruptura de barragens possibilitando a elaboração de mapas que representam as áreas inundadas a jusante da estrutura. A escolha da metodologia adequada deve considerar as informações disponíveis, os custos necessários ao levantamento de dados indisponíveis e o tempo das análises (Melo, 2015 *apud* Kipper, 2022).

4.5.3.1 Modelos hidrodinâmicos

A opção do modelo a ser utilizado deverá depender das características específicas de cada caso, incluindo a complexidade e ocupação do vale a jusante, a importância da barragem, a escala do levantamento topográfico de base e do mapeamento das regiões inundáveis (Almeida, 2001 *apud* Balbi, 2008).

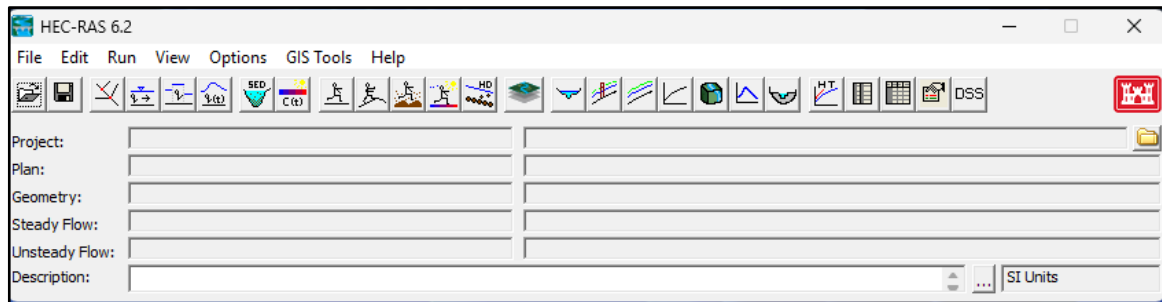
Os modelos utilizados atualmente possuem a mesma base teórica, ou seja, são capazes de determinar as elevações de nível de água e descarga em locais específicos ao longo de um curso de água propenso ao escoamento não-permanente, embasado na solução das equações completas unidimensionais de Saint-Venant, a partir de métodos implícitos de diferenças finitas, permitindo demonstrar, junto com as equações de contorno interno, a variação rápida do fluxo (Lauriano, 2009).

O HEC-RAS, como mencionado no item 3 deste trabalho, é um dos modelos mais utilizados atualmente, possui uma vasta quantidade de materiais para análise e estudo da sua operacionalidade. Segundo Xiong (2011), a ferramenta de ruptura (*dam break*) do HEC-RAS permite simular o rompimento tanto de estruturas transversais, como barragens, quanto de estruturas laterais, como diques. Além disso, o mesmo disponibiliza uma aplicação chamada HEC-GeoRas, que permite a importação de informações geográficas para *softwares* de Sistema de Informação Geográficas (SIG) para simulação, possibilitando resultados para a elaboração de mapas de inundação e de risco (Rubís, 2006 *apud* Balbi, 2008). De acordo com a ANA (2018) o *software* propicia muita precisão e confiabilidade. Dessa forma, neste estudo será utilizado o HEC-RAS como método computacional, sendo o mapa de inundação representado a partir do QGIS.

4.5.3.2 HEC-RAS

Desenvolvido em 1994 pelo *Hydrologic Engineering Center do U. S. Army Corps of Engineers* (USACE), o *Hydrologic Engineering Center – River Analysis System* (HEC-RAS), interface demonstrada pela Imagem 10, um sistema integrado de modelagem hidráulica que realiza simulações de escoamento permanente e não permanente, em uma ou duas dimensões, incluindo análise de transporte de sedimentos com leito móvel, bem como modelagem da temperatura e qualidade da água.

Figura 10 – Interface do HEC-RAS



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), utilizando o software HEC-RAS

De acordo com Coutinho (2015), ainda se fazem necessário mais estudos que comparem os resultados obtidos por ambos os modelos para se chegar a uma conclusão mais precisa sobre as reais vantagens e limitações de cada abordagem. Entretanto, o autor afirma que a modelagem 1D tem demonstrado que os resultados das previsões são satisfatórios, com o ganho de um menor número de variáveis de entrada e menor tempo computacional para o processamento de dados. Segundo Goodell (2016) *apud* Kipper (2022), o uso do modelo 1D se adequa para locais onde o fluxo mantém um padrão unidirecional, sistemas de canais e planícies bem definidos e quando há dados de elevação de qualidade e quantidade ilimitada.

Para análises de *Dam Break*, a solução da simulação se dá a partir das equações de Saint-Venant, sendo, as Equações de Conservação da Massa (Equação 1) e da Conservação da Quantidade de Movimento (Equação 2), para casos unidimensionais (Ferla, 2018).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = g \cdot A \cdot S_0 - g \cdot A \cdot S_f \quad (2)$$

Sendo:

Q : vazão (m³/s);

t : tempo (s);

A : área da seção (m²);

x : distância ao longo do rio no sentido longitudinal (m);

y : profundidade do escoamento (m);

S_0 : declividade do fundo do rio (m/m);

S_f : declividade da linha de energia (m/m);

g : aceleração da gravidade (m/s²).

A Equação 2 também é conhecida como equação dinâmica, e correspondem às forças que atuam sobre o escoamento. A mesma é composta por cinco termos, listados a seguir, que representam aspectos singulares das forças que agem em um volume de controle (USACE, 2016).

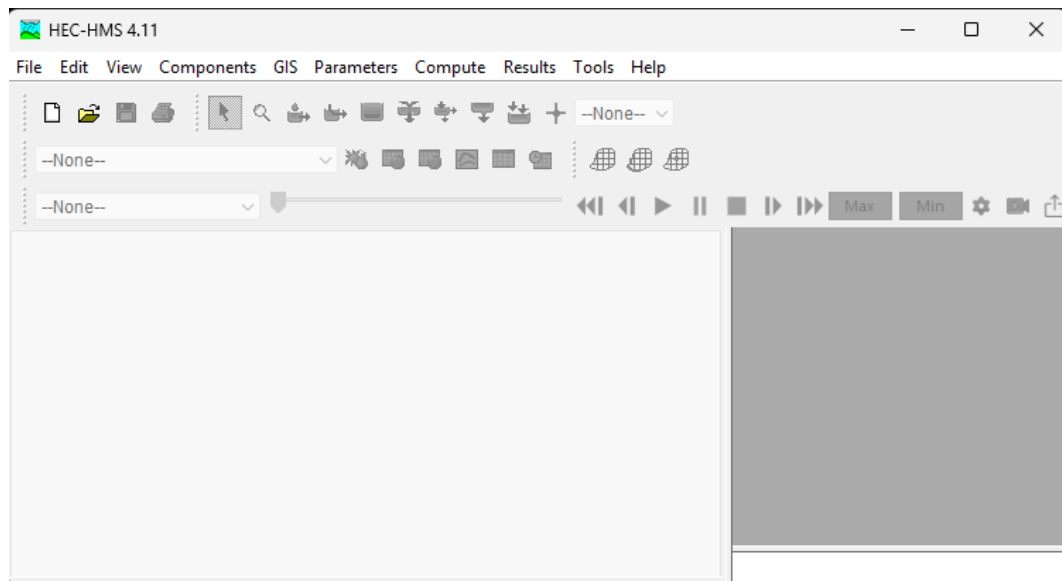
- 1) Termo de inércia local, representa a aceleração da água no volume de controle;
- 2) Termo de inércia advectiva, representa a advecção de quantidade de movimento no volume de controle;
- 3) Termo de pressão, representa o esforço associado à diferença de pressão entre os limites de montante e jusante do volume de controle;
- 4) Termo da força peso, representa o esforço proveniente do peso da massa de água no volume de controle;
- 5) Termo de dissipação de energia, responsável por desacelerar o escoamento, representa o atrito com o fundo e com as margens do rio, entre outros.

De acordo com Fan *et al.* (2014) *apud* Kipper (2022) a omissão total ou parcial dos termos da equação dinâmica gera modelos unidimensionais simplificados. Contudo, uma vez em que todos os termos estejam presentes nas equações de Saint-Venant, o HEC-RAS é chamado de modelo hidrodinâmico (Ferla, 2018).

4.5.3.3 HEC-HMS

O *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), in terface mostrada na Figura 11, também foi desenvolvido pelo USACE e lançado por volta de 2000. De acordo com USACE-HEC (2006) *apud* Uso (2020) o modelo estima o hidrograma unitário sintético gerado por uma bacia hidrográfica, utilizando informações das características físicas e da precipitação dessa bacia. As simulações produzidas geram hidrogramas e tabelas de informações, referentes principalmente aos volumes de deflúvio, vazão de pico e tempo de base. A aplicação da modelagem elaborada pelo programa HEC-HMS pode ser utilizada em diversas áreas de conhecimento, pois seu objetivo principal é a previsão de vazões.

Figura 11 – Interface do HEC-HMS



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), utilizando o software HEC-HMS

4.6 Parâmetros Físicos e Geoespaciais

Além das da definição da geometria da barragem, dos dados das condições de contorno e das características da brecha do rompimento, outros dois fatores essenciais para os modelos hidrodinâmicos são os dados referentes à topografia da área de estudo e ao coeficiente de Manning a ser adotado.

4.6.1 Topografia do vale a jusante

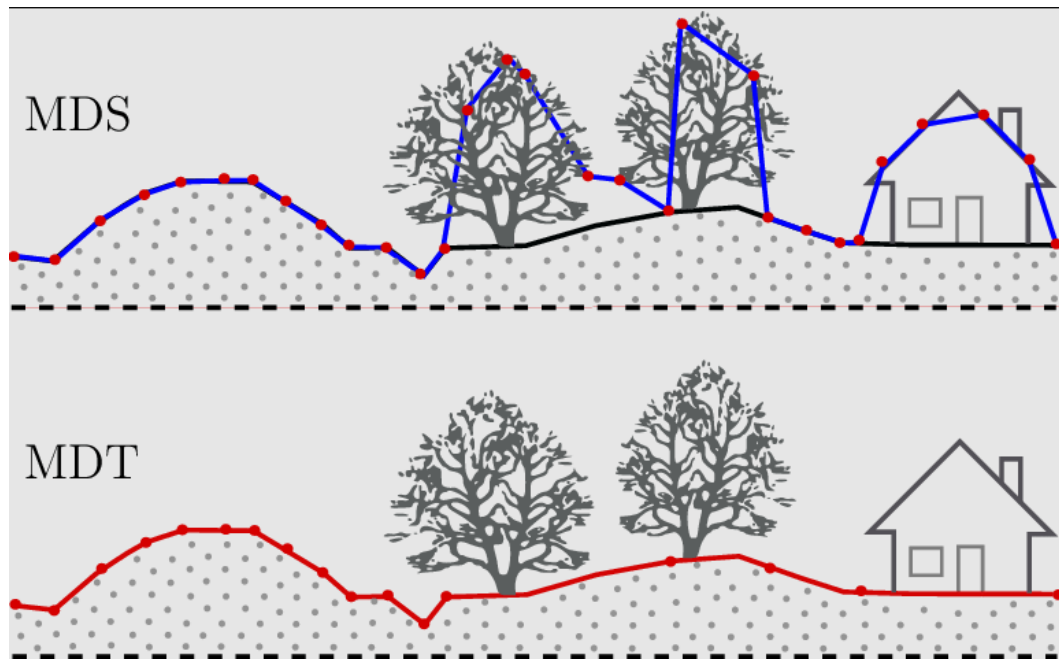
A caracterização do vale a jusante envolve o levantamento de dados topográficos e hidráulicos necessários aos modelos de propagação, que vão desde a definição de dados qualitativos, como pontos peculiares que possam influenciar na forma e característica da cheia, até a obtenção de dados quantitativos, como perfis longitudinais e seções transversais do curso d'água e delimitação de áreas rurais e urbanas (Balbi, 2008).

Para que os dados das características topográficas do vale a jusante do barramento possam ser utilizados em *Dam Breaks*, normalmente é necessária a obtenção de dois dados complementares: batimetria e topografia, a fim de se gerar a topobatimetria da região em estudo. A topografia reúne a caracterização da área seca que virá a ser planície de inundação e a batimetria caracteriza a área molhada sendo ela a calha do rio. Esses dados são relevantes para o estudo de rompimento, pois as características topográficas do vale a jusante da barragem interferem no amortecimento do hidrograma, em maior ou menor intensidade (Ferla, 2018).

Segundo Balbi (2008), a geometria do vale pode ser obtida a partir da topografia levantada por estudos preliminares para construção da barragem ou em cartografia oficial, disponibilizada, por exemplo, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O autor aponta que podem ser utilizadas imagens aéreas e de satélites reconstituídas, modelos digitais de terreno (MDT), dados obtidos por equipamentos a laser ou obtenção de perfis através de topografia clássica.

É importante definir e diferenciar os modelos digitais, de acordo com Jensen (2009) *apud* Kipper (2022), o uso do termo modelo digitais de elevação (MDE) é genérico e pode ser divididos em dois: modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de superfície (MDS). Os MDT's estão relacionados a representações digitais da superfície terrestre nua, ou seja, sem a presença de estruturas como árvores, edifícios, ou qualquer objeto físico. Ou seja, nestes modelos são eliminados todos os elementos que estão acima da superfície do terreno. Por outro lado, os MDS's estão relacionados a representações digitais da superfície terrestre, incluindo objetos físicos que estão dispostos sobre o solo (Trindade, 2024). A Figura 12 evidencia a diferença entre tais modelos digitais.

Figura 12 – Diferença entre o MDS e o MDT



Fonte: Barbosa *et al.* (2021)

Em sua pesquisa, Kipper (2022) comparou quatro bases topográficas de origens distintas para a modelagem de um *dam break*. O estudo utilizou três MDEs gratuitos, baseados nos mapeamentos Copernicus e SRTM (resolução de 30 m), e um MDT obtido in loco via seções topobatimétricas (resolução de 1 m). Embora todas as bases tenham apresentado resultados satisfatórios, a autora observou discrepâncias significativas na mancha de inundação: os modelos gratuitos superestimaram a área atingida em 1,37 a 1,48 vezes quando comparados ao levantamento de campo.

4.6.2 Coeficiente de rugosidade de Manning

A equação de Manning (Equação 03) é utilizada com o objetivo de determinar parâmetros hidráulicos de um escoamento ou dos elementos geométricos de um conduto com superfície livre como a vazão de cursos d'água naturais (Oliveira, 2020).

$$Q = \frac{1}{n} \cdot S^{1/2} \cdot A \cdot Rh^{2/3} \quad (3)$$

Onde:

Q: vazão na seção analisada (m³/s);

n: coeficiente de rugosidade de Manning (sm^{-1/3});

S: declividade da linha de energia (m/m);

A: área molhada da seção para a profundidade analisada (m²);

Rh: raio hidráulico da seção para a profundidade analisada (m).

O coeficiente de rugosidade de Manning estabelece o atrito que o terreno exerce sobre o fluxo de escoamento, sendo fundamental para descrever a dinâmica da vazão sobre uma superfície (Li e Zhang, 2001). O ajuste da rugosidade de cursos d'água a um modelo hidrodinâmico fornece informações referentes ao nível de água, vazão e a velocidade de escoamento em qualquer trecho (Martoni & Lessa, 1999a, Ab. Ghani *et al.*, 2007 *apud* Lyra *et al.*, 2009).

Segundo Chow (1959) *apud* Kipper (2022), a escolha dos coeficientes de rugosidade deve ser cautelosa principalmente em áreas que possuem troca de características físicas, pois elas atuam como obstáculo para os escoamentos e possuem diferentes coeficientes de rugosidade. A Tabela 1 demonstra valores adotados para o Coeficiente de Rugosidade (n) para diferentes superfícies.

Tabela 1 – Estimativas do coeficiente de Manning ($sm^{-1/3}$)

Local de Escoamento	Material ou Condição	Valores típicos de n	
Canais artificiais	Concreto com juntas ou rugosidade leve	0,015	0,017
	Canal revestido com pedra (irregular)	0,020	0,030
Canais e leitos naturais	Leito de areia lisa	0,017	0,020
	Leito de seixo ou pedras médias	0,025	0,035
	Córrego com vegetação baixa nas margens	0,030	0,040
	Córrego com vegetação densa	0,050	0,100
	Leito lamacento ou fundo irregular	0,030	0,050
	Canal natural sinuoso (sem vegetação densa)	0,025	0,045
	Canal natural com curvas e vegetação	0,035	0,070
Áreas urbanas (escoamento superficial)	Rua asfaltada (bem nivelada)	0,013	0,016
	Calçada ou laje	0,011	0,015
	Gramado ou terreno gramado	0,030	0,050
	Solo arado ou terreno irregular	0,040	0,060

Fonte: Adaptado de Ven Te Chow (1959), Barnes (1967)

5. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as etapas estabelecidas para a condução do estudo, com o propósito de alcançar os objetivos definidos e demonstrar de forma clara os procedimentos adotados ao longo do trabalho, conforme descrito a seguir:

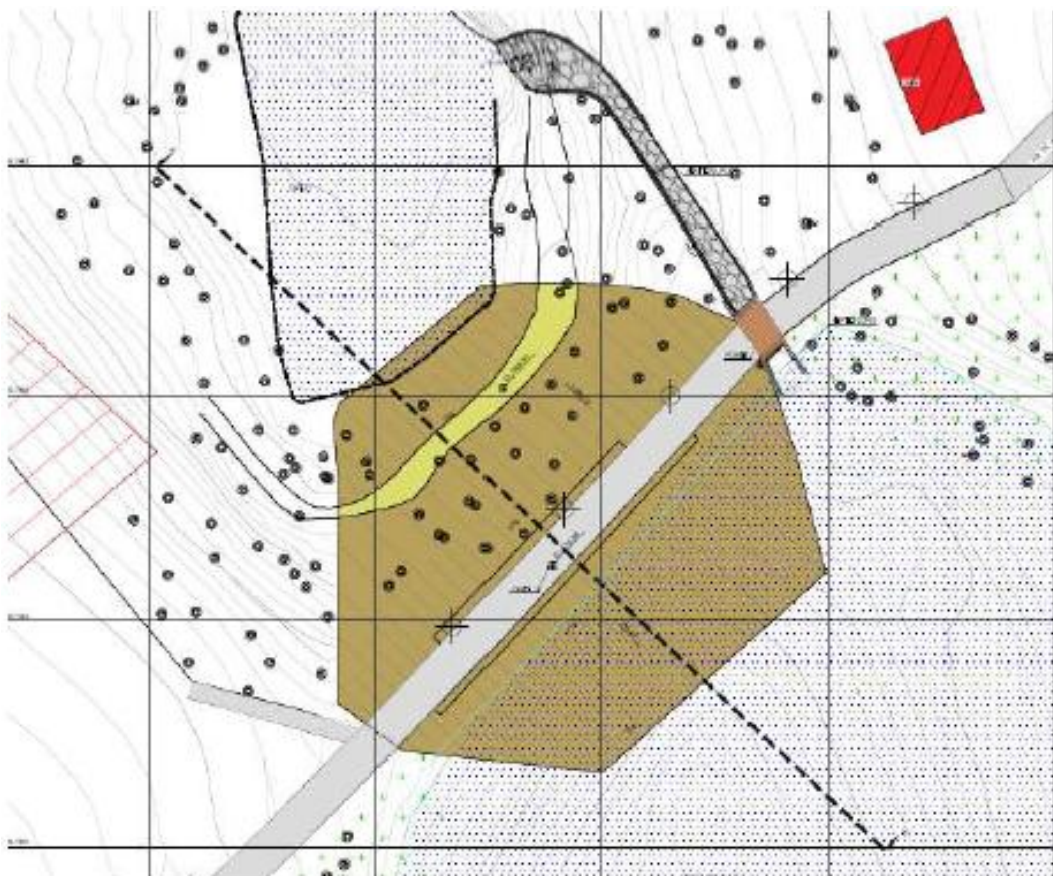
- a) Caracterização da área de estudo: foram reunidas as informações técnicas da barragem Parque Lagoa do Nado, incluindo caracterização do aterro, dimensões do vertedouro, projetos disponibilizados e apresentação do diagnóstico após a ruptura.
- b) Definição da projeção e da base topográfica: trata-se da configuração e importação da projeção e dos MDT's para o *HEC-RAS*, garantindo o correto georreferenciamento e caracterização da topografia da região de estudo.
- c) Elaboração da geometria: realizado sobre o MDT, nesta etapa, é traçada a seção da barragem e a perimetração na região de jusante, além da definição das malhas ou *grid*, importante para o escoamento superficial gerado pelo modelo.
- d) Definição do hidrograma de ruptura e da brecha: etapas realizadas em concomitância, através do *HEC-RAS* é possível gerar os parâmetros de brecha de acordo com as equações citadas, tais informações são levadas ao *HEC-HMS* para obtenção do hidrograma de ruptura, sendo este levado de volta ao *HEC-RAS* para que seja realizada a propagação.
- e) Adoção de condições de contorno: inclusão de uma condição de contorno no eixo da barragem, sendo o hidrograma de ruptura, e a condição de contorno a jusante, definida como profundidade normal, localizada na região onde defina-se o final do escoamento.
- f) Definição do coeficiente de Manning: definição dos coeficientes para todo o perímetro a jusante.

5.1 Caracterização da área de estudo

Para caracterizar a estrutura e conduzir a análise, foram utilizadas informações extraídas dos relatórios “Estudo de Ruptura Hipotética da Bacia de Detenção Parque Lagoa do Nado”, elaborado em dezembro de 2021, e “Laudo Técnico de Ruptura Barragem Lagoa do Nado”, elaborado em novembro de 2024. Ambos disponibilizados pela Secretaria Municipal de Obras e Infraestrutura (SMOBI) da Prefeitura de Belo Horizonte através da Lei de Acesso à Informação (LAI).

A Barragem do Parque Lagoa do Nado encontrava-se no município de Belo Horizonte – MG, coordenadas 19°49'56,02"S e 43°57'36,33"W, e tinha função paisagística e de controle de cheias. Sua construção remonta à década de 1940 e não são conhecidos registros e/ou projetos da época da construção do barramento. A barragem estava sob responsabilidade da Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP) da Prefeitura de Belo Horizonte e possuía documentação AS IS constante no Volume II do PSB. As Figuras 13 e 14 a seguir demonstram parte da planta baixa e os taludes da barragem antes do rompimento.

Figura 13 – Disposição geral da barragem do Parque Lagoa do Nado



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte - SMOBI (2021)

Figura 14 – Vista do talude: (A) jusante; (B) montante



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte - SMOBI (2024)

A barragem Parque Lagoa do Nado era de terra homogênea compactada com largura da crista de 6,40 m, comprimento de crista igual a 47,90 m, talude montante com inclinação 1V:2H, talude de jusante com inclinação 1V:1,5H e um vertedouro com soleira livre e emboque tipo canal construído na margem direita. As principais informações técnicas acerca da barragem encontram-se na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Dados Técnicos da Barragem Parque Lagoa do Nado

Elevação da crista da barragem (m)	771,00
Elevação da fundação (m)	763,00
Altura da barragem (m)	8,00
Comprimento do coroamento da barragem (m)	47,90
Largura da crista (m)	6,40
Inclinação do talude de jusante	1V:1,5H
Inclinação do talude de montante	1V:2,0H
Volume máximo armazenado pelo reservatório (m ³)	75.398,00

Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte - SMOBI (2021)

O vertedouro possuía soleira na elevação 769,87 m, emboque em seção retangular de 2,10 m de largura e 1,09 m de altura e dava vazão ao excedente hídrico através de uma calha de seção variável revestida com pedra argamassada.

5.1.1 Ruptura da Barragem

A ruptura da barragem ocorreu no dia 13/11/2024, por volta das 16 horas, após a ocorrência de um galgamento, onde se comprovou o total esvaziamento do reservatório. A

Figura 15 apresenta a situação do maciço e parte do local onde encontrava-se o reservatório após a ocorrência do evento, destaca-se o formato final da breca de ruptura.

Figura 15 – Situação do barramento após a ruptura



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte - SMOBI (2024)

Após a inspeção da estrutura, a equipe responsável observou a presença de 3 anteparos de madeira (*stoplogs*) do lado esquerdo do emboque rompido do vertedouro. Tais anteparos serviam como uma ferramenta para o controle de nível d'água do reservatório, entretanto não deveriam estar presentes devido ao período chuvoso. Em 31 de outubro de 2025 ocorreu uma inspeção rotineira da barragem e estruturas anexas e ficou registrado que se fazia a necessidade da remoção completa dos *stoplogs*. A Figura 16 evidencia um comparativo do emboque do vertedouro antes e após o rompimento, sendo que, as setas amarelas chamam a atenção para a presença dos stoplogs e a seta vermelha para a mureta também rompida.

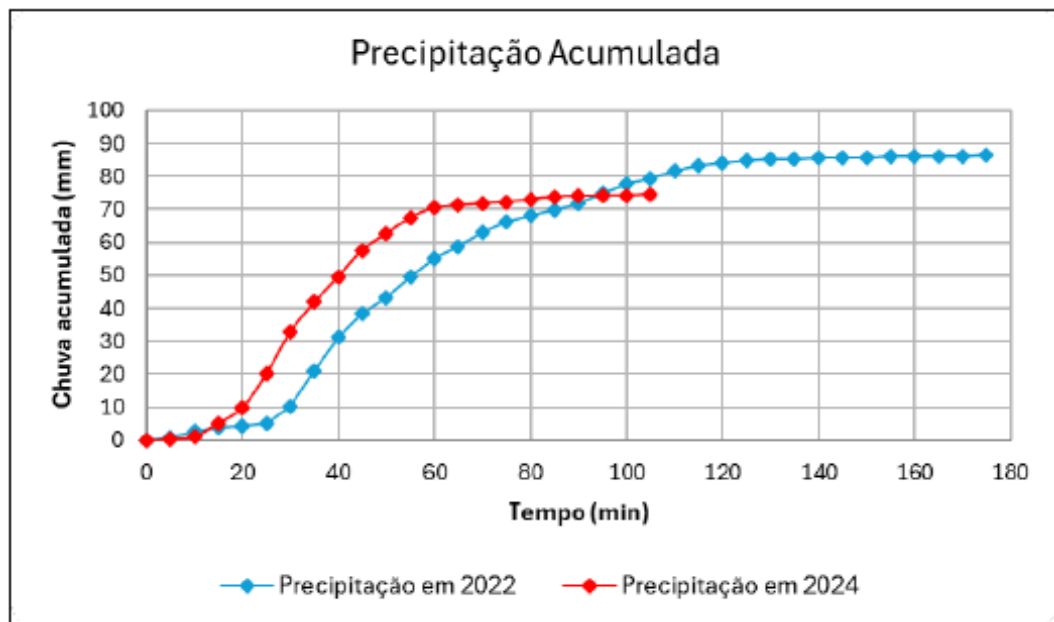
Figura 16 – Emboque do vertedouro: (A) antes do rompimento; (B) após o rompimento



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte - SMOBI (2024)

A chuva que ocasionou o rompimento foi registrada pela estação pluviométrica E7, instalada próxima ao Parque Lagoa do Nado, que apontou uma duração de 1 hora e 45 minutos (105 minutos) e um volume de chuva acumulada de 74,40 mm. Em 2022, a mesma estação, registrou uma chuva que teve aproximadamente 3 horas (180 minutos) e volume acumulado de 86,40 mm, ou seja, 12 mm a mais em relação a de 2024, sem que acontecesse o colapso. A Figura 17 apresenta um gráfico comparativo com os dados dessas precipitações.

Figura 17 – Comparativo entra as precipitações ocorridas em 2022 e 2024



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte - SMOBI (2024)

Com base nos dados de precipitação registrados em 2024, a empresa responsável pela análise da ruptura transformou essas informações em escoamento superficial por meio do

Modelo Chuva-Vazão (SCS), obtendo inicialmente um hidrograma triangular e, em seguida, um hidrograma de cheia. As condições de amortecimento de cheias no reservatório foram avaliadas utilizando o *software* HEC-HMS, que também permitiu a análise de dois cenários: (1) simulação hidrológico-hidráulica do vertedouro sem o uso de stoplog e (2) simulação hidrológico-hidráulica do vertedouro com stoplog.

Os resultados obtidos foram condizentes com o esperado, indicando que, aproximadamente uma hora após o início da chuva, teve início o processo de galgamento no cenário com a presença do stoplog. Observou-se ainda que, na ausência desses anteparos, a ruptura da barragem não ocorreria.

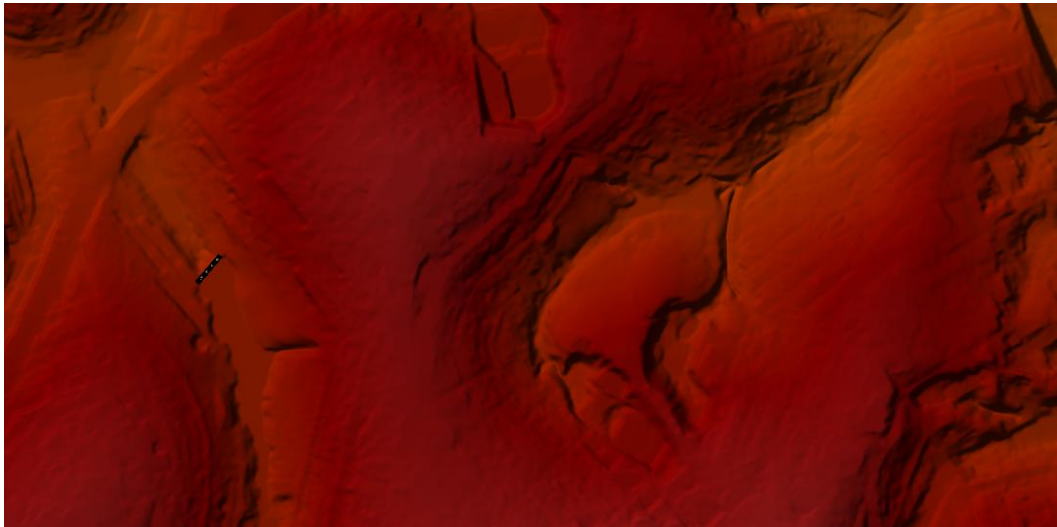
5.2 Projeção e bases topográficas

Para a inserção das bases topográficas no HEC-RAS, tornou-se necessário, inicialmente, definir e importar um sistema de projeção compatível. O sistema adotado foi o EPSG:31983 – SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S, obtido por meio do site *Spatial Reference*. O datum SIRGAS 2000, oficialmente reconhecido pelo IBGE, apresenta compatibilidade com dados GNSS modernos e oferece maior acurácia na representação cartográfica. A escolha da zona 23 Sul justifica-se pela localização da área de estudo, situada na região de Belo Horizonte – MG, o que garante a correta sobreposição e interpretação dos dados topográficos, hidrológicos e geoespaciais utilizados nas simulações.

Em relação às bases topográficas, representada pela Figura 18, em uma região próxima ao barramento, foram adotadas para elaboração desse estudo:

- 1) Modelo Digital de Terreno da Prodabel (2015) - dados altimétricos levantados por tecnologias LIDAR;
- 2) Modelo Digital de Terreno para a região do Rio das Velhas – Dados fornecidos pelo EHR–UFMG.

Figura 18 – Representação do MDT da área próximo ao reservatório



Fonte: Elaborado pelo autor (2025) com auxílio do *software* HEC-RAS

5.3 Elaboração da geometria

A construção da geometria da área de estudo foi realizada por meio do *RAS Mapper*, interface cartográfica do HEC-RAS. Com base no MDT, identificou-se a localização da barragem e, a partir dela, delimitou-se as regiões a montante e jusante. Após essa etapa, é possível realizar as edições necessárias para o modelo, como por exemplo, incluir opções de *Map Layer*, que pode ser uma camada do Google Satélite, Bing Satélite, dentre outros.

A partir da ferramenta “*AS/2D Connections*” realizou-se a caracterização da barragem, seguindo o traçado e respeitando o comprimento da crista, além de incluir a informação acerca da largura da crista, nesse caso 6,40 m, conforme indicado na Tabela 2. Quanto à definição dos perímetros, neste trabalho, foi considerada apenas a área a jusante do barramento, com o uso da ferramenta “*2D Flow Areas*” e em seguida “*Perimeters*”, uma vez que será importado um hidrograma de ruptura — dispensando, assim, a delimitação da área a montante. Ressalta-se que a correta demarcação do perímetro, além de uma coerente definição do *grid*, definido como 30x30 m, influenciam diretamente no tempo de processamento do modelo: áreas maiores e pixels mais detalhados exigem mais tempo para a geração dos resultados.

A área definida pela marcação do perímetro delimita a região que ocorrerá o escoamento após o rompimento da barragem. Apesar disso, o fluxo gerado pelo escoamento não irá abranger toda essa região, pois o mesmo terá um caminho preferencial. Esse caminho geralmente acontece nas regiões próximas a vales de um curso d’água e/ou nas elevações com cotas inferiores. Para que a simulação consiga representar esse comportamento com uma melhor

precisão utiliza-se as ferramentas *Breaklines* e *Refinement Regions*. Neste modelo não foi considerado o traçado da rede de drenagem pluvial, pois, partiu-se do princípio que tais estruturas estariam totalmente cheias no caso de uma inundação.

As *Breaklines* ajustam o alinhamento das células da malha dentro do perímetro, otimizando a representação do relevo e garantindo que o escoamento siga adequadamente o canal. Para este modelo, considerou-se espaçamento de 5 m nas células próximas à linha, a fim de obter um detalhamento maior nessa região. O refinamento, por sua vez, melhora a qualidade dos pixels ao redor do perímetro, contribuindo para uma maior precisão hidráulica na área de interesse. Na imagem a seguir é possível observar a interface do MDT após a utilização dessas ferramentas, onde a região cinza representa o perímetro, o traçado em azul indica a *breakline* e as áreas em vermelho correspondem às regiões de refinamento, com um grid de 15x15 m.

Figura 19 – Aplicação das ferramentas do RasMapper no MDT



Fonte: Elaborado pelo autor (2025) com auxílio do *software* HEC-RAS

5.4 Definição da brecha e do hidrograma de ruptura

É possível caracterizar a brecha de ruptura de diferentes maneiras no HEC-RAS. Neste trabalho, tal caracterização foi realizada com base nas equações desenvolvidas pelos autores apresentados na Tabela 2. O próprio HEC-RAS disponibiliza uma forma simplificada de obtenção desses valores por meio da ferramenta *Parameter Calculator*, encontrada dentro do módulo *Unsteady Flow Analysis*.

Para a escolha do método mais adequado, realizou-se uma comparação com uma imagem da brecha real (Figura 20). A partir da informação do comprimento de crista, presente na Tabela 4, elaborou-se uma escala baseada na proporção e mediu-se a largura de topo da brecha por meio de ferramentas de análise geospacial. Como normalmente as brechas possuem formato trapezoidal, geralmente a sua largura de fundo (*bf*) é menor do que a de topo.

Figura 20 – Medição da brecha real



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 21 apresenta os resultados gerados, após a inserção de alguns dos dados presentes na Tabela 4, sendo: elevação do topo da barragem, elevação do reservatório no momento da ruptura, elevação do fundo da brecha e volume do reservatório no momento da ruptura. Além disso, o modo de falha por galgamento justifica o fato de o nível d'água e a cota de topo da estrutura apresentarem o mesmo valor no instante do rompimento.

Figura 21 - Cálculo da Brecha de Ruptura no HAC-RAS

Breach This Structure

Breach Method:

Center Station:

Final Bottom Width:

Final Bottom Elevation:

Left Side Slope:

Right Side Slope:

Breach Weir Coef:

Breach Formation Time (hrs):

Failure Mode:

Piping Coefficient:

Initial Piping Elev:

Trigger Failure at:

Starting WS:

Breach Plot | Breach Progression | Simplified Physical | Physical Breaching (DLBreach) | Parameter Calculator | Breach Repair (optional)

Input Data

Top of Dam Elevation (m): Breach Bottom Elevation (m):

Pool Elevation at Failure (m): Pool Volume at Failure (1000 m3):

Failure mode:

MacDonald

Dam Crest Width (m): Slope of US Dam Face Z1 (H:V):

Earth Fill Type: Slope of DS Dam Face Z2 (H:V):

Xu Zhang (and Von Thun)

Dam Type: Dam Erodibility:

Method	Breach Bottom Width (m)	Side Slopes (H:V)	Breach Development Time (hrs)	
MacDonald et al	1	0.5	0.20	<input type="button" value="Select"/>
Froehlich (1995)	2	1.4	0.15	<input type="button" value="Select"/>
Froehlich (2008)	6	1	0.19	<input type="button" value="Select"/>
Von Thun & Gillete	22	0.5	0.41	<input type="button" value="Select"/>
Xu & Zhang	6	0.98	0.40 *	<input type="button" value="Select"/>

* Note: the breach development time from the Xu Zhang equation includes more of the initial erosion period and post erosion than what is used in the HEC-RAS breach formation time.

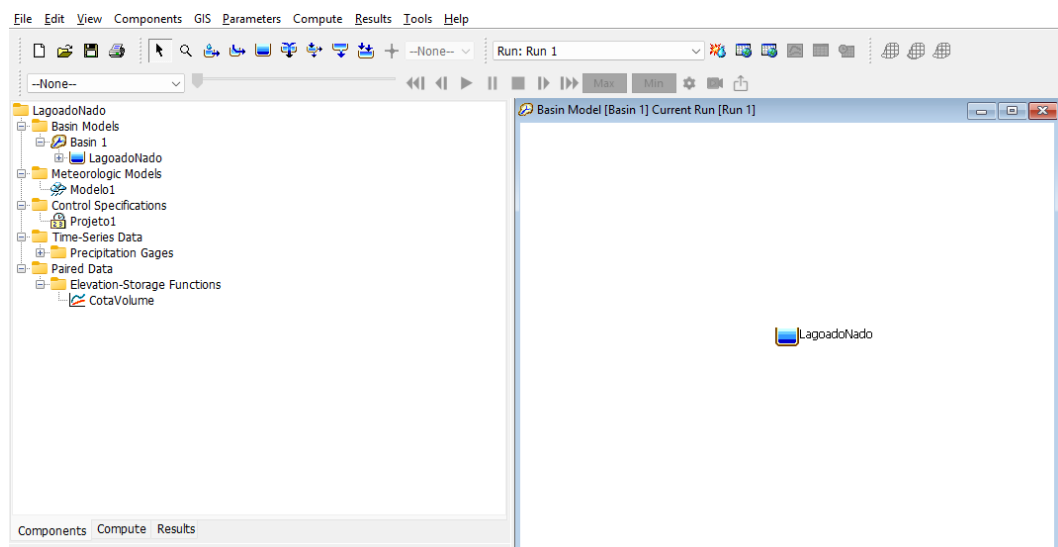
Fonte: Elaborado pelo autor (2025) com auxílio do *software* HEC-HMS

Portanto, afirma-se que a largura de fundo da brecha gerada pela a equação de Von Thun e Gillette foi a que mais se aproximou em comparação à medida apresentada pela Figura 16, sendo tais valores utilizados como dados de entrada para a obtenção do hidrograma de ruptura.

5.4.1 Hidrograma de ruptura

Para obtenção do hidrograma de ruptura, foi utilizado o HEC-HMS e para isso, fez-se necessário a configuração de componentes do *software* tendo como base os parâmetros da brecha de ruptura, presentes na Figura 21, e informações técnicas acerca do reservatório, presentes na Tabela 4. A Figura 22 demonstra a interface do *software* e as principais ferramentas utilizadas para a elaboração do hidrograma.

Figura 22 – Interface do HEC-HMS



Fonte: Elaborado pelo autor (2025) com auxílio do *software* HEC-HMS

O início da modelagem ocorre após a inclusão de um reservatório associado a uma bacia. Vale ressaltar que o objetivo foi obter apenas o hidrograma de ruptura; por isso, não há necessidade de inserir os dados das bacias e/ou sub-bacias reais que normalmente fariam parte do processo. Nesse momento, três informações principais são necessárias: a cota de elevação inicial (correspondente à crista da barragem, 771,00 m), a tabela Cota x Volume e a configuração no *software* indicando que a simulação será um *dam break* por galgamento.

Os dados de Cota x Volume foram inseridos por meio da ferramenta *Paired Data*, onde as informações presentes na Tabela 3 a seguir foram diretamente transcritas para o *software*. Com isso é possível fazer a associação entre tais valores e o reservatório. Importante

caracterizar as cotas 769,87 e 771,00, pois correspondiam, respectivamente, à soleira do vertedouro e da crista da barragem.

Tabela 3 – Cota x Área x Volume

Cota (m)	Área (m)	Volume (m ³)
763,00	0	0
763,50	237	64
764,00	714	330
764,50	1294	832
765,00	2440	1842
765,50	3780	3421
766,00	4651	5558
766,50	6010	8222
767,00	7590	11637
767,50	9670	15917
768,00	11960	21347
768,50	14840	28253
769,00	16690	36143
769,50	18150	44860
769,87	19200	51770
770,00	19580	54292
770,50	21090	64457
770,96	22540	74495
771,00	22620	75398

Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte - SMOBI (2024)

Com a utilização do *Control Specifications* configurou-se a duração do evento de ruptura como 1 h e também o intervalo de tempo em que os resultados seriam gerados, definido de 1 em 1 minuto. Outra ferramenta importante para o correto funcionamento da simulação é a *Meteorologic Models*, onde os dados de precipitação são incluídos, porém, para este caso e resultados esperados, não se faz necessário a entrada de tais dados, mas para o correto funcionamento do modelo, é preciso a relação de tal ferramenta à Bacia criada.

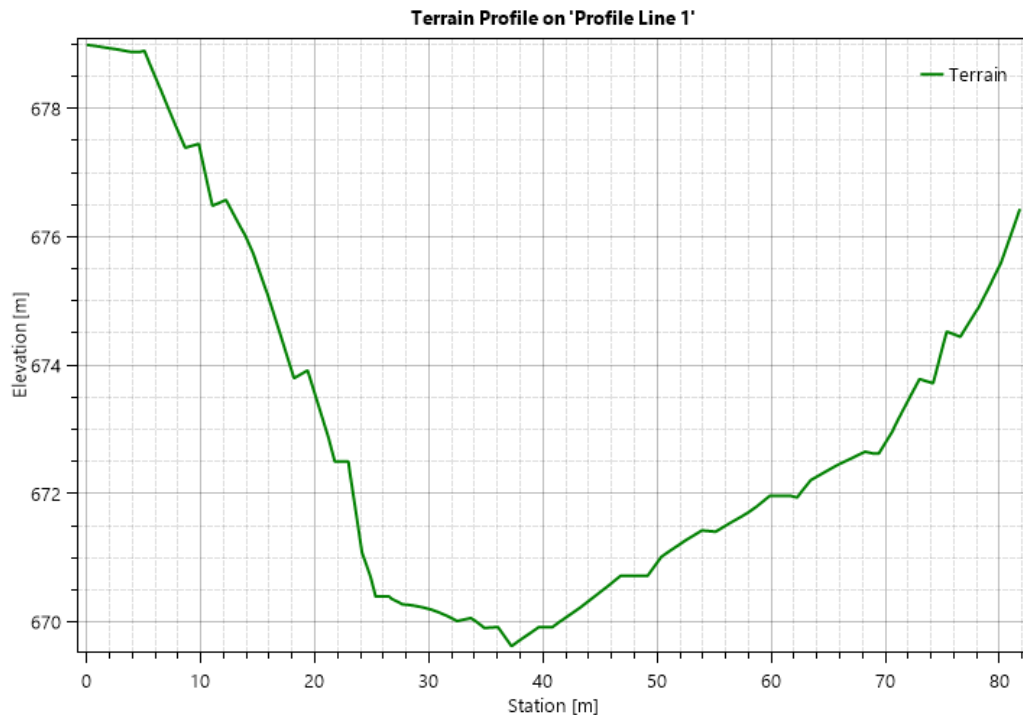
Feito isso torna-se possível gerar a simulação e obtém-se os gráficos de Cota x Volume, demonstrando o esvaziamento do reservatório ao longo do tempo, e o hidrograma de ruptura (Vazão x Tempo em minutos), que servirá como uma condição de contorno para o modelo no HEC-RAS.

5.5 Condições de Contorno

As Condições de Contorno ou *Boundary Condition* são responsáveis por acrescentar informações de vazões, nível d'água e/ou profundidades (normal ou crítica) nas regiões delimitadas à montante e jusante do barramento. A escolha, dentre as disponíveis pelo *software*, varia conforme a ocasião e dados disponíveis para a realização da modelagem. Neste trabalho, foram adotadas duas condições de contorno, a *Flow Hydrograph*, localizada no eixo da barragem, onde foram introduzidos os dados provenientes do hidrograma de ruptura, e a jusante a *Normal Depth*, localizada no final do perímetro, que coincidiu com um trecho do Rio das Velhas. É importante ressaltar que as contribuições de sub-bacias não foram levadas em consideração, sendo a ruptura da barragem o único efeito para as análises a jusante.'

O dado de entrada para a *Normal Depth* (profundidade normal) é a inclinação do trecho onde foi posicionado a linha da condição de contorno, sendo assim, é possível utilizar a ferramenta *Terrain Profile*, dentro do *Ras Mapper*, que gerou o gráfico Distância x Elevação a seguir e facilitou a determinação da inclinação média do trecho.

Figura 23 – Seção Transversal do trecho de condição de contorno



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Pelo gráfico, é possível observar que as principais profundidades da calha do rio se dão entre os trechos 30 a 60 m no eixo das abcissas, o que representa elevações que variam aproximadamente de 670 a 672 m, pelo eixo das coordenadas. Utilizou-se a formulação padrão de inclinação ($\Delta y / \Delta x$) para calcular uma inclinação de 0,67%, sendo tal valor adotado como a Profundidade Normal do trecho.

5.6 Uso e ocupação do solo

Para determinar com a maior precisão os valores dos coeficientes de Manning da área de interesse a jusante, correspondente à demarcação do perímetro, utilizou-se o *site* do MapBiomas Brasil, através do mapa do uso e ocupação do solo. Após o *download*, obteve-se um arquivo Raster de todo o território nacional, sendo necessário a localização e edição apenas da região de interesse.

Para isso, realizou-se o *download* do perímetro diretamente do RAS Mapper (HEC-RAS), com extensão shp e, através do QGIS, abriram-se ambos os arquivos. Como toda a região do RAS Mapper está georreferenciada, foi possível utilizar o shapefile do perímetro como máscara para o raster. Isso permitiu que toda a área excedente fosse cortada obtendo-se o raster

apenas da área de interesse. Em seguida, realizou-se a vetorização do raster, transformando o arquivo em shapefile.

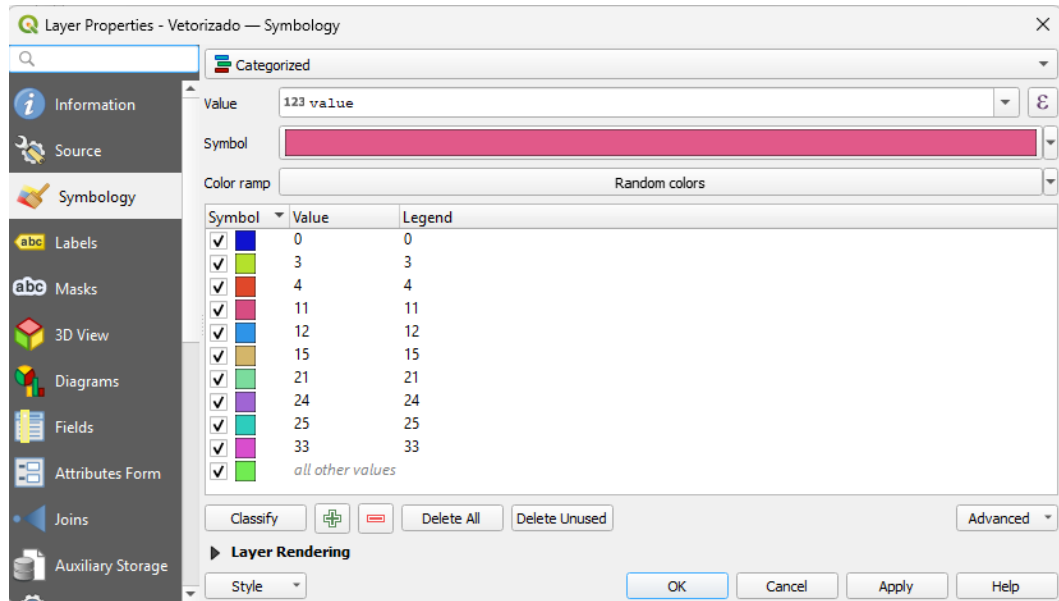
A principal vantagem da utilização do MapBiomias neste processo são as classificações do uso do solo a partir de uma codificação, sendo possível observá-las na Tabela 4. Já a Figura 24 demonstra as classificações presentes para área de interesse, percebe-se um total de nove classes diferentes.

Tabela 4 – Uso e ocupação do solo com suas devidas classificações

 Códigos da legenda para os valores de pixel na Coleção 8 do MapBiomas				
COLEÇÃO 8 - CLASSES	COLLECTION 8 - CLASSES	New ID	New Hexacode Number	New Color
1. Floresta	1. Forest	1	#32a65e	
1.1 Formação Florestal	1.1. Forest Formation	3	#1f8d49	
1.2. Formação Savânica	1.2. Savanna Formation	4	#7dc975	
1.3. Mangue	1.3. Mangrove	5	#04381d	
1.4. Floresta Alagável (beta)	1.4 Floodable Forest (beta)	6	#026975	
1.5. Restinga Arbórea	1.5. Wooded Sandbank Vegetation	49	#02d659	
2. Formação Natural não Florestal	2. Non Forest Natural Formation	10	#ad975a	
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa	2.1. Wetland	11	#519799	
2.2. Formação Campestre	2.2. Grassland	12	#d6bc74	
2.3. Apicum	2.3. Hypersaline Tidal Flat	32	#fc8114	
2.4. Afloramento Rochoso	2.4. Rocky Outcrop	29	#ffaa5f	
2.5. Restinga Herbácea	2.5. Herbaceous Sandbank Vegetation	50	#ad5100	
2.6. Outras Formações não Florestais	2.6. Other non Forest Formations	13	#d89f5c	
3. Agropecuária	3. Farming	14	#FFFFB2	
3.1. Pastagem	3.1. Pasture	15	#edde8e	
3.2. Agricultura	3.2. Agriculture	18	#E974ED	
3.2.1. Lavoura Temporária	3.2.1. Temporary Crop	19	#C27BA0	
3.2.1.1. Soja	3.2.1.1. Soybean	39	#f5b3c8	
3.2.1.2. Cana	3.2.1.2. Sugar cane	20	#db7093	
3.2.1.3. Arroz	3.2.1.3. Rice	40	#c71585	
3.2.1.4. Algodão (beta)	3.2.1.4. Cotton (beta)	62	#ff69b4	
3.2.1.5. Outras Lavouras Temporárias	3.2.1.5. Other Temporary Crops	41	#f54ca9	
3.2.2. Lavoura Perene	3.2.2. Perennial Crop	36	#d082de	
3.2.2.1. Café	3.2.2.1. Coffee	46	#d68fe2	
3.2.2.2. Citrus	3.2.2.2. Citrus	47	#9932cc	
3.2.2.3. Dendê (beta)	3.2.2.3. Palm Oil (beta)	35	#9065d0	
3.2.2.4. Outras Lavouras Perenes	3.2.2.4. Other Perennial Crops	48	#e6ccff	
3.3. Silvicultura	3.3. Forest Plantation	9	#7a5900	
3.4. Mosaico de Usos	3.4. Mosaic of Uses	21	#ffefc3	
4. Área não Vegetada	4. Non vegetated area	22	#d4271e	
4.1. Praia, Duna e Areal	4.1. Beach, Dune and Sand Spot	23	#ffa07a	
4.2. Área Urbanizada	4.2. Urban Area	24	#d4271e	
4.3. Mineração	4.3. Mining	30	#9c0027	
4.4. Outras Áreas não Vegetadas	4.4. Other non Vegetated Areas	25	#db4d4f	
5. Corpo D'água	5. Water	26	#0000FF	
5.1 Rio, Lago e Oceano	5.1. River, Lake and Ocean	33	#2532e4	
5.2 Aquicultura	5.2. Aquaculture	31	#091077	
6. Não observado	6. Not Observed	27	#ffffff	

Fonte: MapBiomas do Brasil (2025)

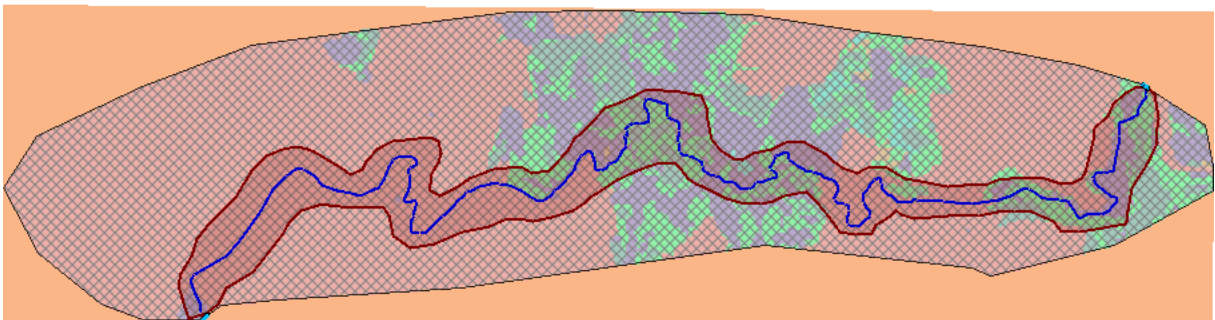
Figura 24 – Código das classes de uso e ocupação do solo da área de interesse (conforme as classificações da Tabela 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* QGIS

A importação do *shapefile* obtido para o HEC-RAS é feito através do Ras Mapper, por meio de opção “Land Cover Layer”, a partir disso automaticamente é criado um Map Layer cujo denominação é LandCover com exatamente com as mesmas cores e códigos provenientes do QGIS, conforme demonstrado pela Figura 25. Os coeficientes de Manning foram introduzidos diretamente na tabela de atributos de tal mapa.

Figura 25 – Layout do perímetro a jusante junto às classificações do uso e cobertura do solo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

A Tabela 5 a seguir resume as classes e os códigos, proveniente do MapBiomias, e o coeficiente de Manning atribuído a cada um, sendo que, utilizou-se a Tabela 3 como parâmetro para tal definição.

Tabela 5 – Tabela de atributos do LandCover

Classe	ID	Manning ($sm^{-1/3}$)
Área Urbanizada	24	0,013
Formação Florestal	3	0,100
Pastagem	15	0,030
Mosaico de Usos	21	0,030
Formação Savânica	4	0,080
Formação Campestre	12	0,030
Outras Áreas Não Vegetadas	25	0,013
Rio	33	0,035
Campo Alagado	11	0,030

Fonte: Elaboração própria (2025)

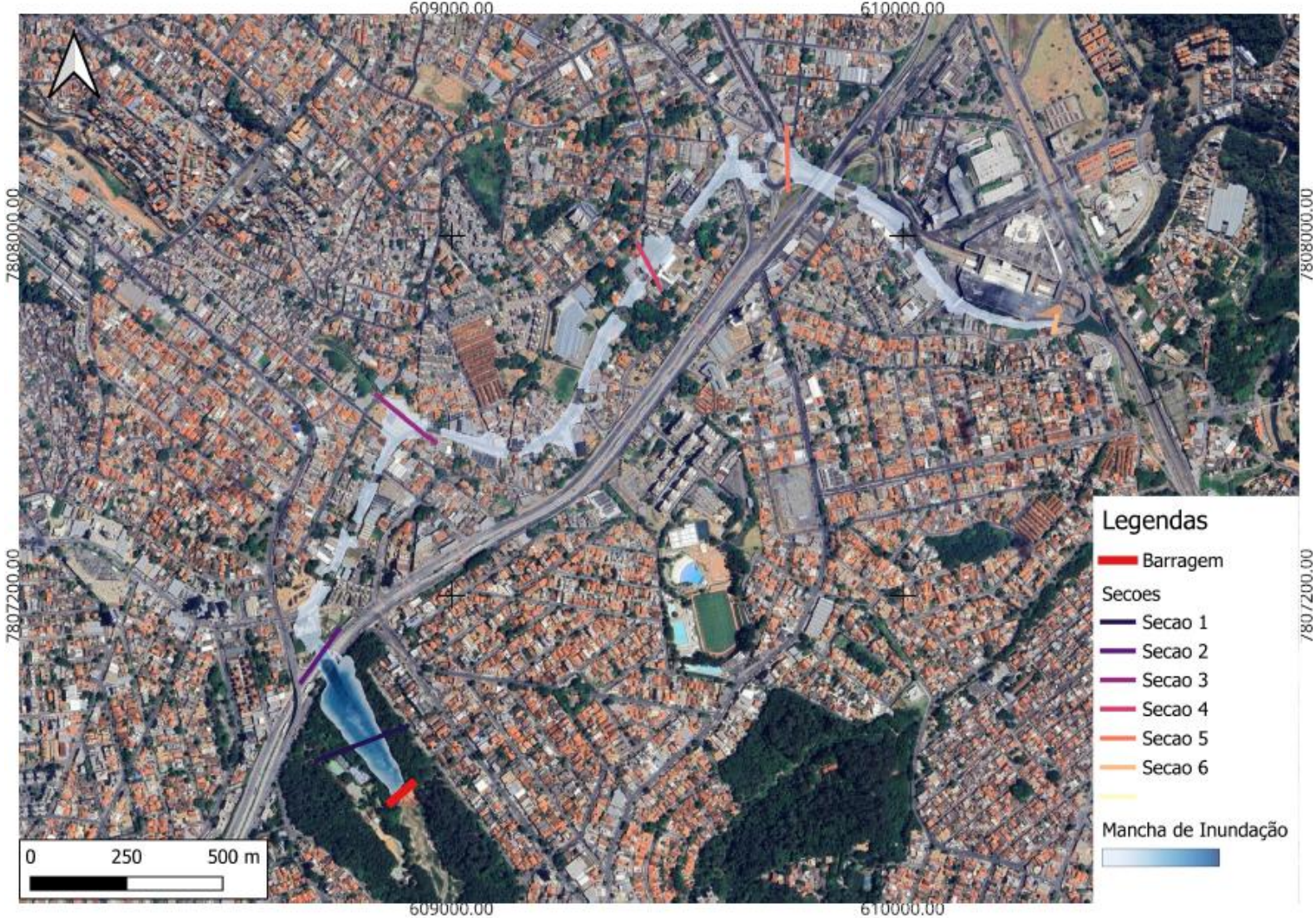
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, após a execução do modelo e, conseqüentemente, a propagação da cheia pelo *Ras Mapper*, além da exposição dos dados da brecha de ruptura e o hidrograma de ruptura, obtido pelo HEC-HMS. Para obtenção dos gráficos e demais informações relevantes, foram traçadas seções transversais em diferentes regiões ao longo da região inundada.

O mapa a seguir (Figura 26) corresponde a mancha de inundação obtida na simulação, atingindo-se uma área de 102.268 m² com uma extensão de 3 km. Tendo em vista a razão da área pelo comprimento, a largura média da inundação ficou em 34 metros, o que mostra uma certa canalização da água pelas ruas da região. Com isso, observou-se que de 45 a 55 edificações foram atingidas diretamente (através de uma verificação visual), entre casas, comércios e galpões, confirmando o grande impacto material que o rompimento causou nessa área urbana.

As seções foram posicionadas com intuito de analisar locais em que a mancha de inundação apresentou aspectos distintos, além de seu trecho inicial e final. Para cada seção será apresentado o perfil transversal do terreno, a profundidade da lâmina d'água no momento de pico da inundação, velocidade no momento de pico e hidrograma de cheia.

Figura 26 – Mapa de inundação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

6.1 Brecha de ruptura e hidrograma de ruptura

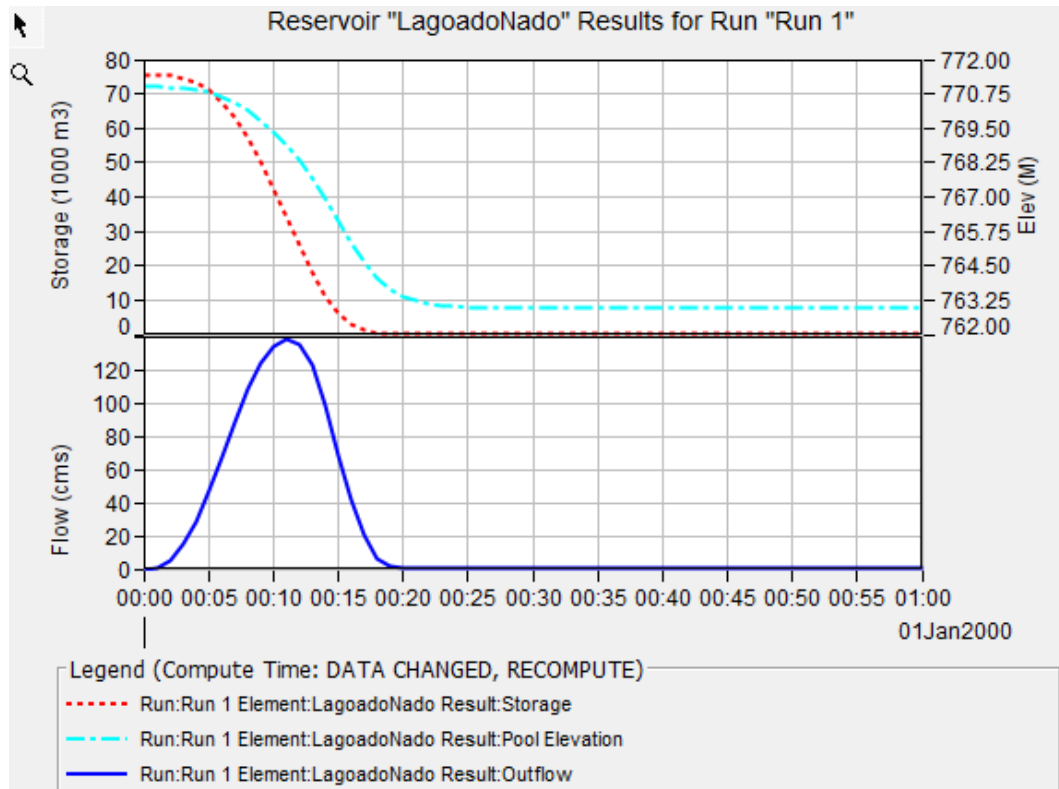
Após a realização dos procedimentos descritos no item 5.4, obteve-se os parâmetros da brecha de ruptura e o hidrograma de ruptura, representados a seguir na Tabela 6 e Figura 27 respectivamente.

Tabela 6 – Brecha de Ruptura

Método	Largura do Fundo da Brecha (m)	Inclinação dos Taludes Laterais (H:V)	Tempo de formação da Brecha (h)
Von Thun e Gilete	22	0,50	0,41

Fonte: Elaborado pelo autor (2025) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 27 – Resultados provenientes do HEC-HMS

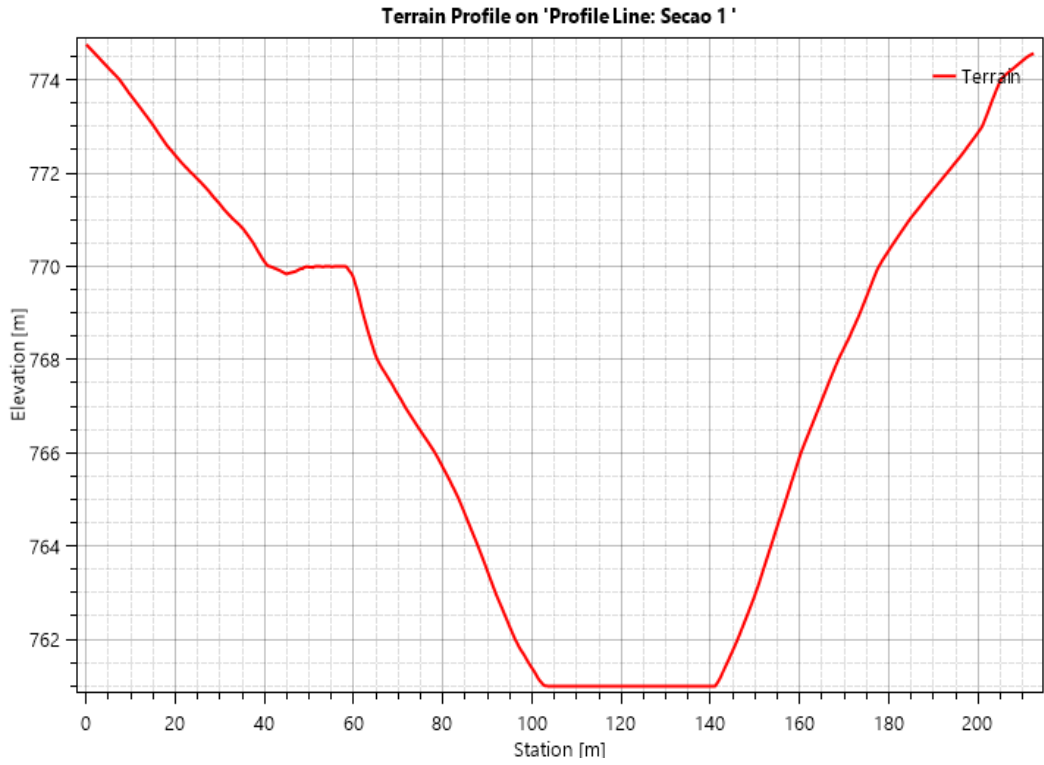


Fonte: Elaborado pelo autor (2025) com auxílio do *software* HEC-HMS

6.2 Seção 1

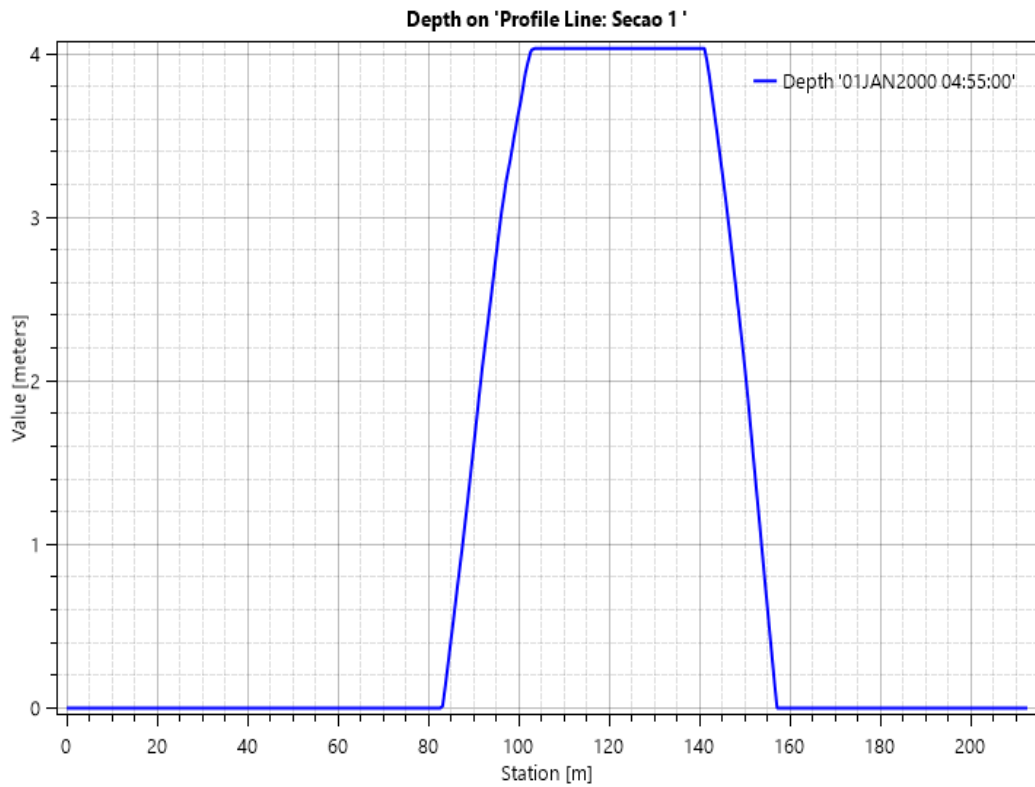
A seção 1 localiza-se imediatamente após a barragem, ou seja, na região do parque Lagoa do Nado. Seu posicionamento gera uma semelhança entre o hidrograma obtido e o hidrograma de ruptura. Além disso, servirá de base para que seja possível observar o amortecimento da onda de cheia nas próximas seções.

Figura 28 – Perfil do terreno (Seção 1)



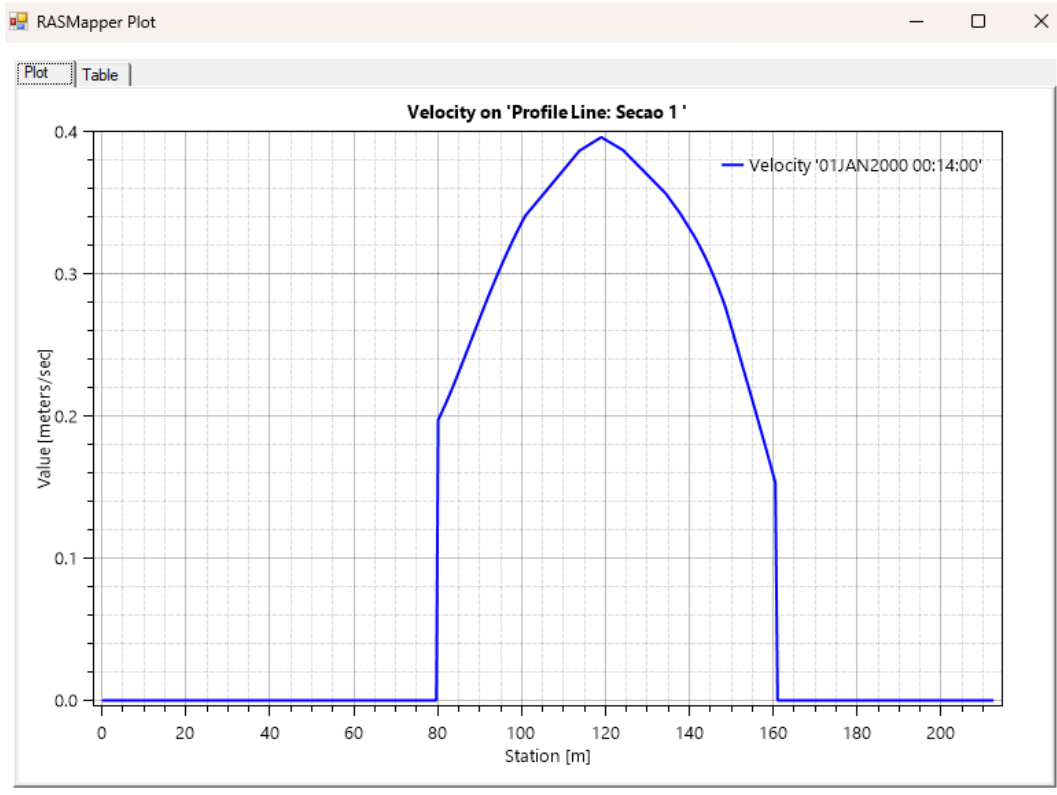
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 29 – Profundidade da água (Seção 1)



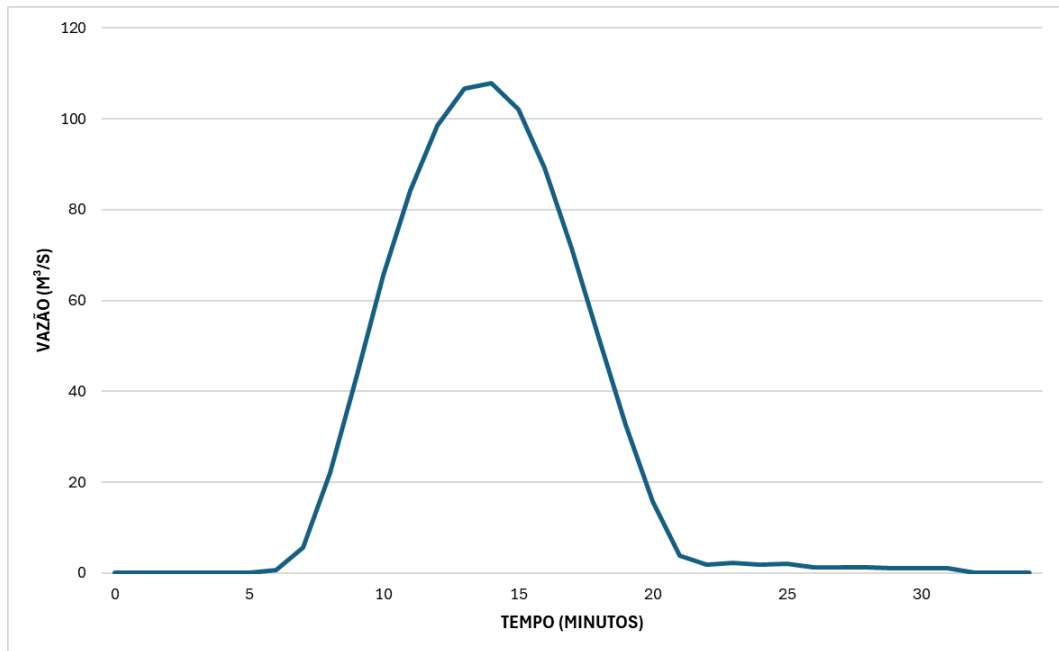
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 30 – Velocidade da água (Seção 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 31 – Hidrograma da onda de cheia (Seção 1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

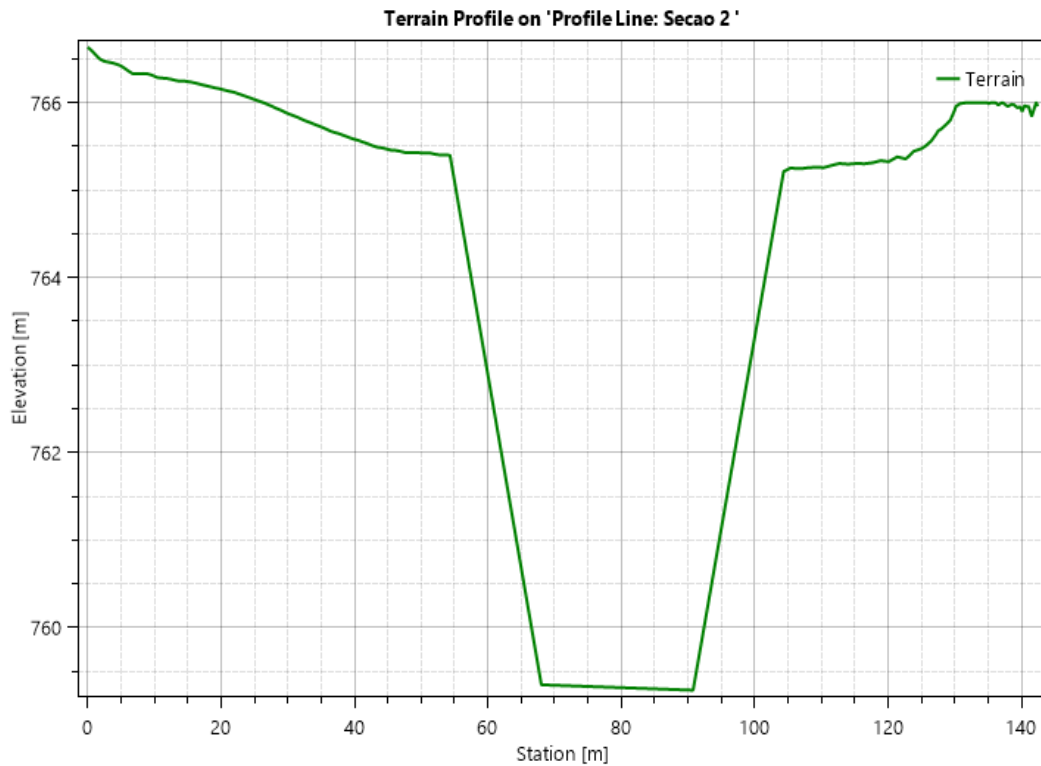
Os gráficos demonstrados pelas Figuras 28 e 29 indicam que a profundidade da água segue o perfil do terreno. A seção 1 comporta-se como uma calha, de acordo com as cotas topográficas, o que contribui com a profundidade máxima de aproximadamente 4 metros. Tal

profundidade também é diretamente influenciada pela vazão de pico de 107.91 m³/s sendo atingida 14 minutos após a ruptura, indicado na Figura 31. A velocidade de 0.40 m/s, relativamente baixa, justifica-se pela presença de uma densa vegetação no local, conforme demonstrado pela Figura 30.

6.3 Seção 2

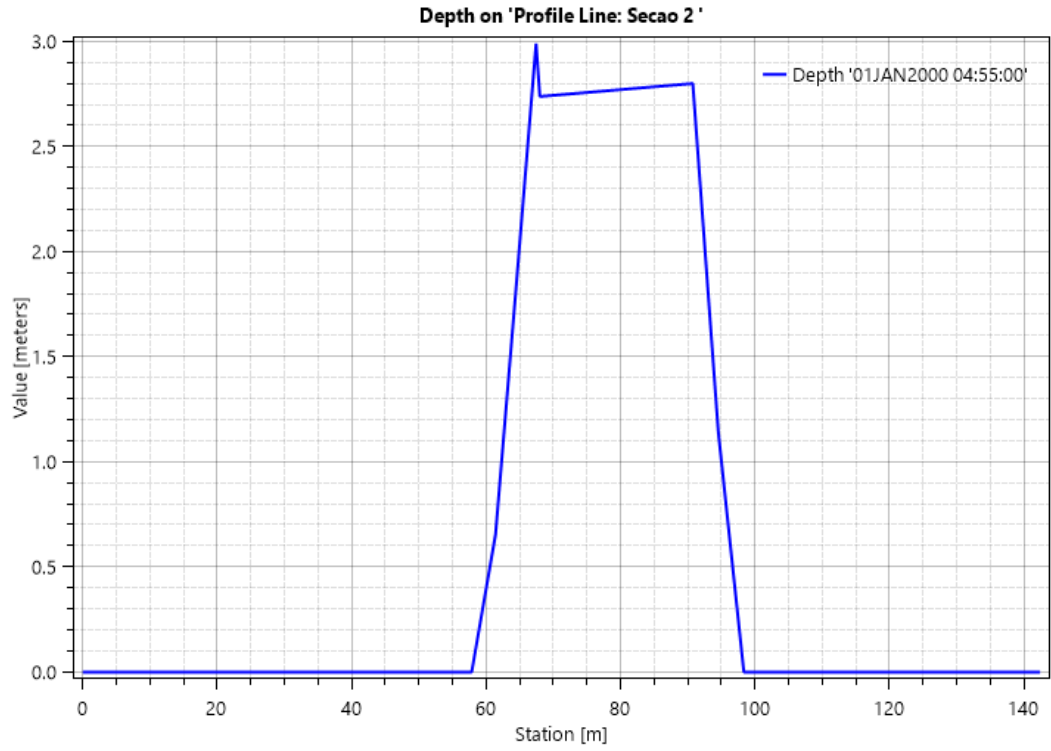
A seção 2 localiza-se ao longo da Avenida Dom Pedro I, umas das principais vias da cidade por onde trafegam inúmeros veículos diariamente.

Figura 32 – Perfil do terreno (Seção 2)



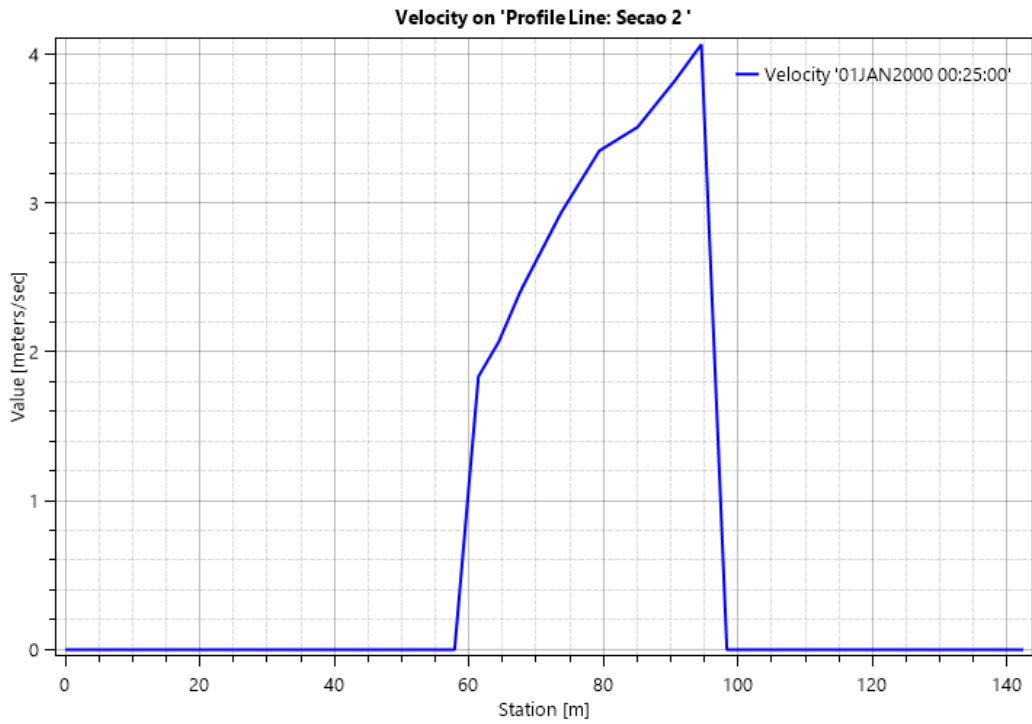
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 33 – Profundidade da água (Seção 2)



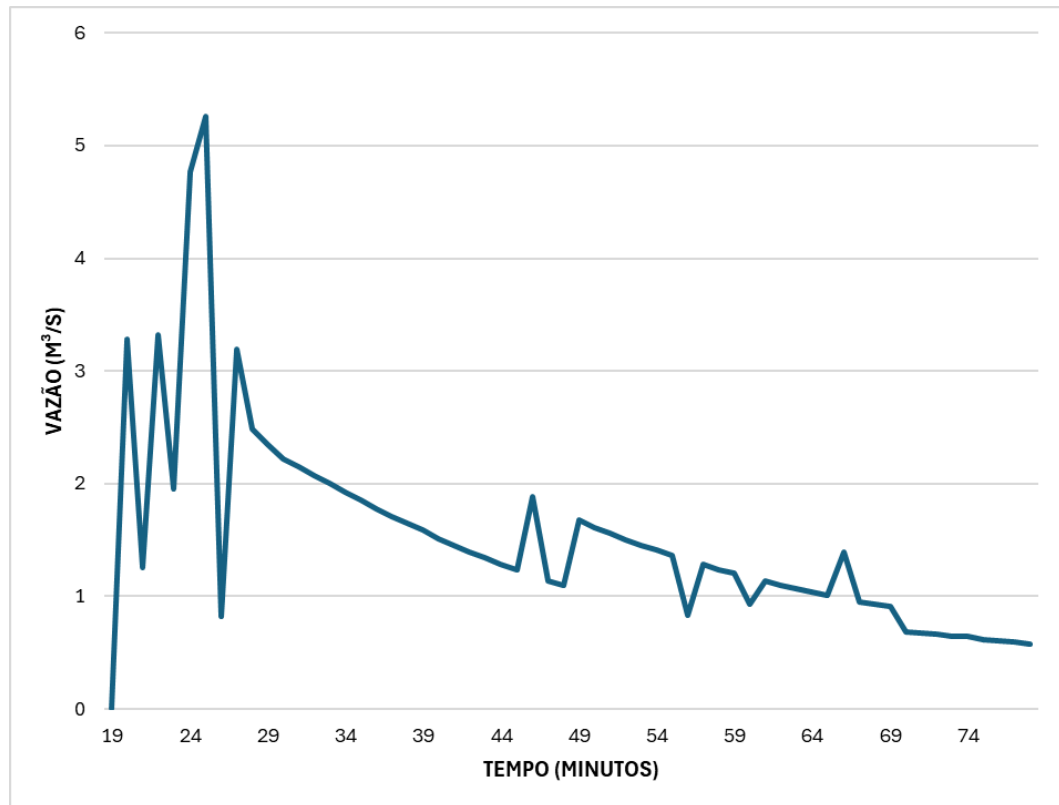
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 34 – Velocidade da água (Seção 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 35 – Hidrograma da onda de cheia (Seção 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

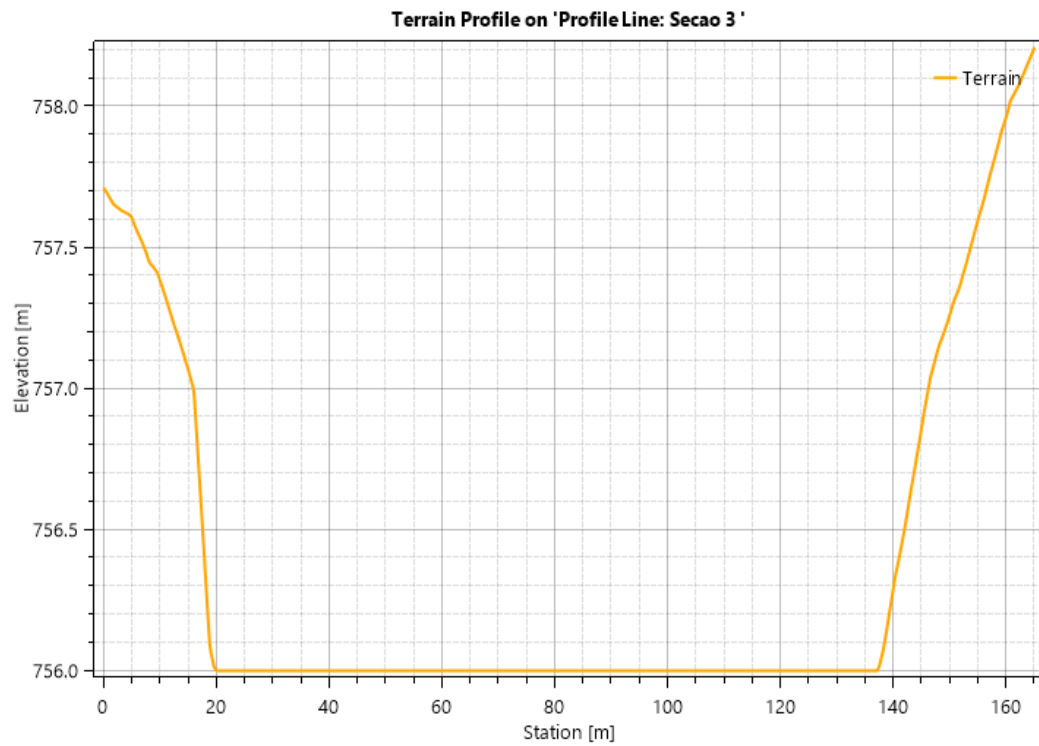
Perpendicularmente à seção 2, para possibilitar a continuação do escoamento, realizou-se uma modificação no terreno (MDT) através da ferramenta “Lines;Channel”, que caracteriza-se por um corte na seção, gerando cotas topográficas mais baixas. A edição fez-se necessária devido à uma grande descontinuidade da mancha de inundação no local, o que não faz sentido pela proximidade da seção à barragem. Apesar de tal edição ser um procedimento comum, pode acarretar nos resultados obtidos, como se observa no gráfico da Figura 35.

Apesar disso, observa-se um expressivo amortecimento da onda de cheia em comparação à Seção 1. Esse fenômeno é justificado pela presença de uma área de aproximadamente 21.300 m² de vegetação densa antes da Seção 2, que eleva a rugosidade do terreno e favorece a espacialização do fluxo, reduzindo consideravelmente a vazão de pico. A vazão de pico reduziu de 107,91 m³/s para 5,20 m³/s, enquanto a profundidade máxima foi de 5,00 m para aproximadamente 3,00 m, apontado pela Figura 33. Em contrapartida, a velocidade do escoamento aumentou consideravelmente, passando de 0,40 m/s para cerca de 5 m/s (Figura 35). Esse aumento é justificado pela mudança da rugosidade do solo, que transita de uma vegetação densa na Seção 1 para um asfalto na Seção 2.

6.4 Seção 3

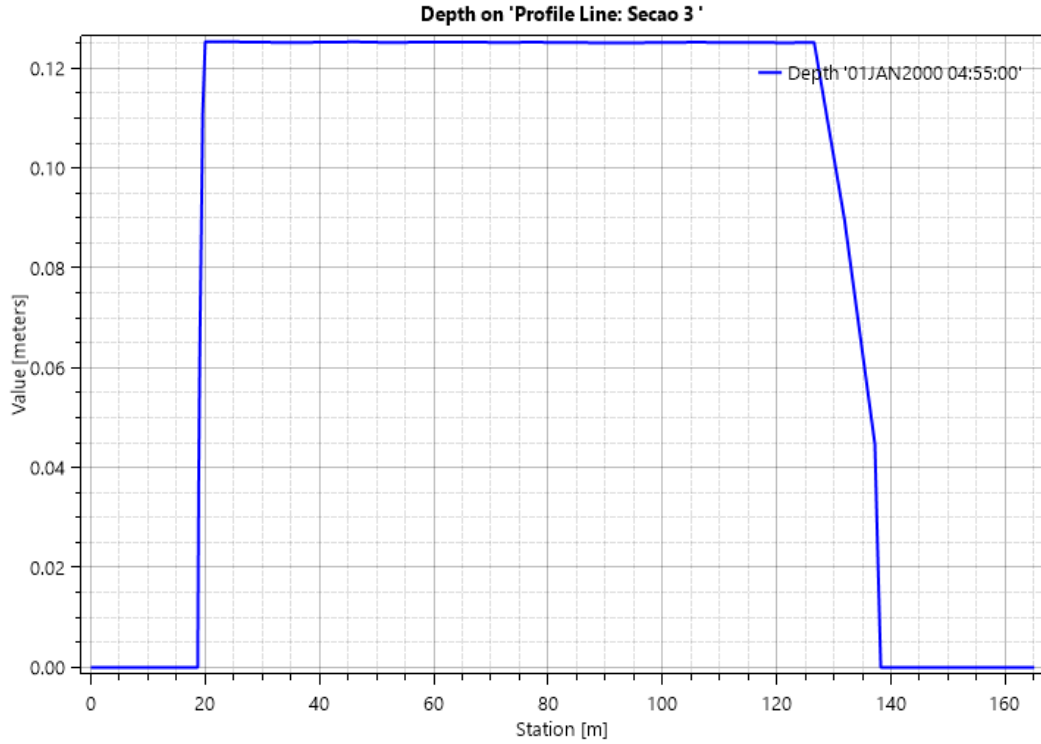
A seção 3 localiza-se na Praça São João Batista, no encontro das Ruas Professor Aimoré Dutra e Dr. Álvaro Camargo, região caracterizada pela reincidência de alagamentos no período chuvoso.

Figura 36 – Perfil do terreno (Seção 3)



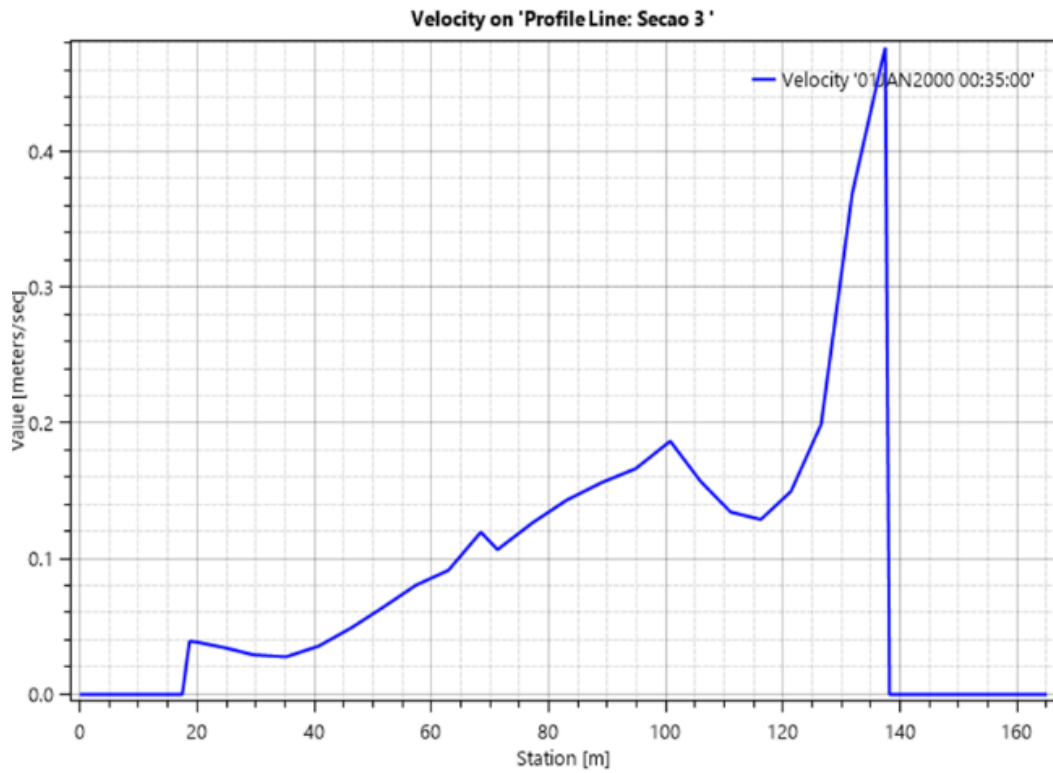
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 37 – Profundidade da água (Seção 3)



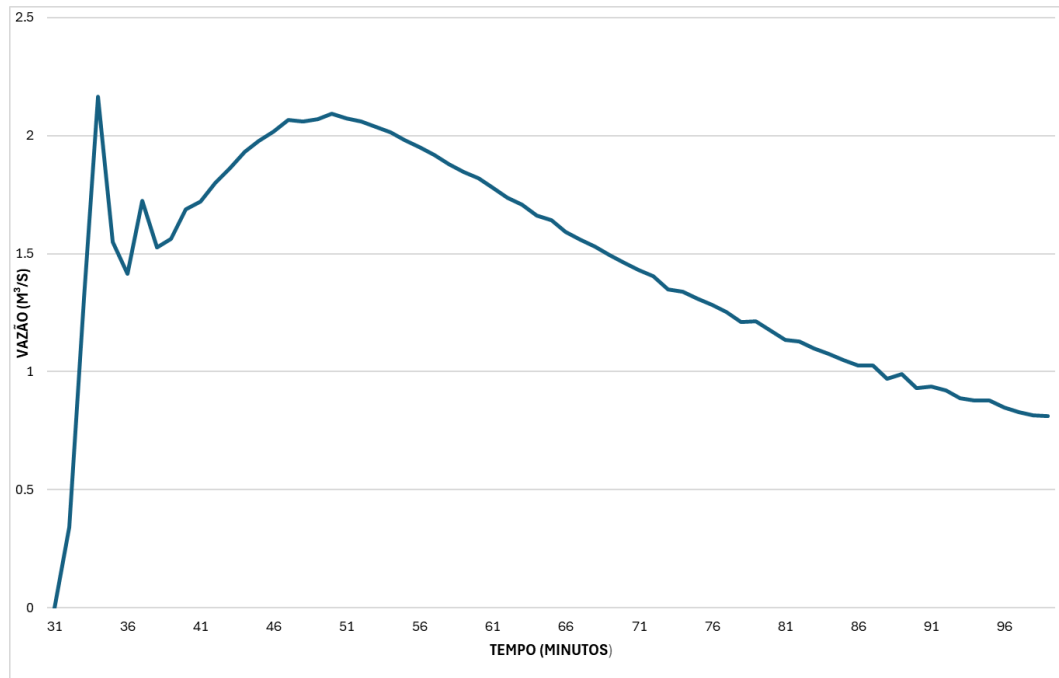
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 38 – Velocidade da água (Seção 3)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 39 – Hidrograma da onda de cheia (Seção 3)



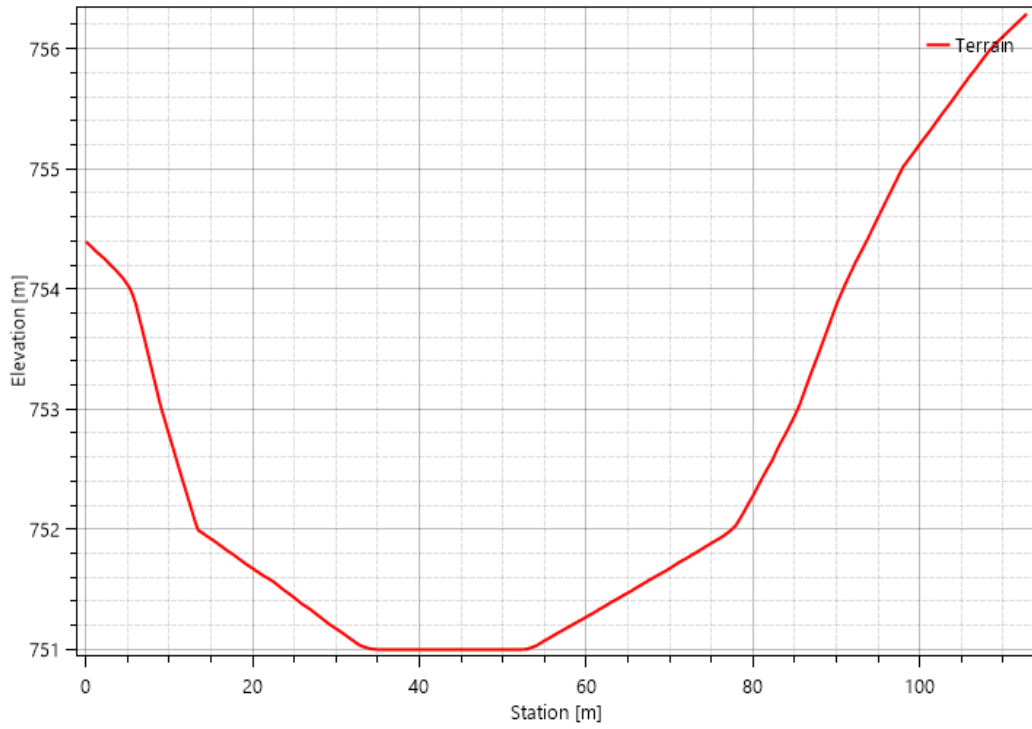
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Diferentemente das anteriores, esta seção apresenta 120 metros de terreno plano e praticamente uniforme (Figura 36). Isso gera uma área maior para o escoamento atingir, gerando profundidades menores, sendo de apenas 12 cm, de acordo com a Figura 37. A vazão de pico foi superior a 2 m³/s, sendo que, a região alagou-se após 30 minutos do rompimento da barragem e demorou cerca de 3 horas para que o amortecimento da cheia acontecesse, conforme demonstrado pelo o hidrograma na Figura 39. A velocidade reduziu consideravelmente em comparação com a Seção 2, apontado pela Figura 38, o que já era esperado pelo fato da redução da vazão e pela topografia do local.

6.5 Seção 4

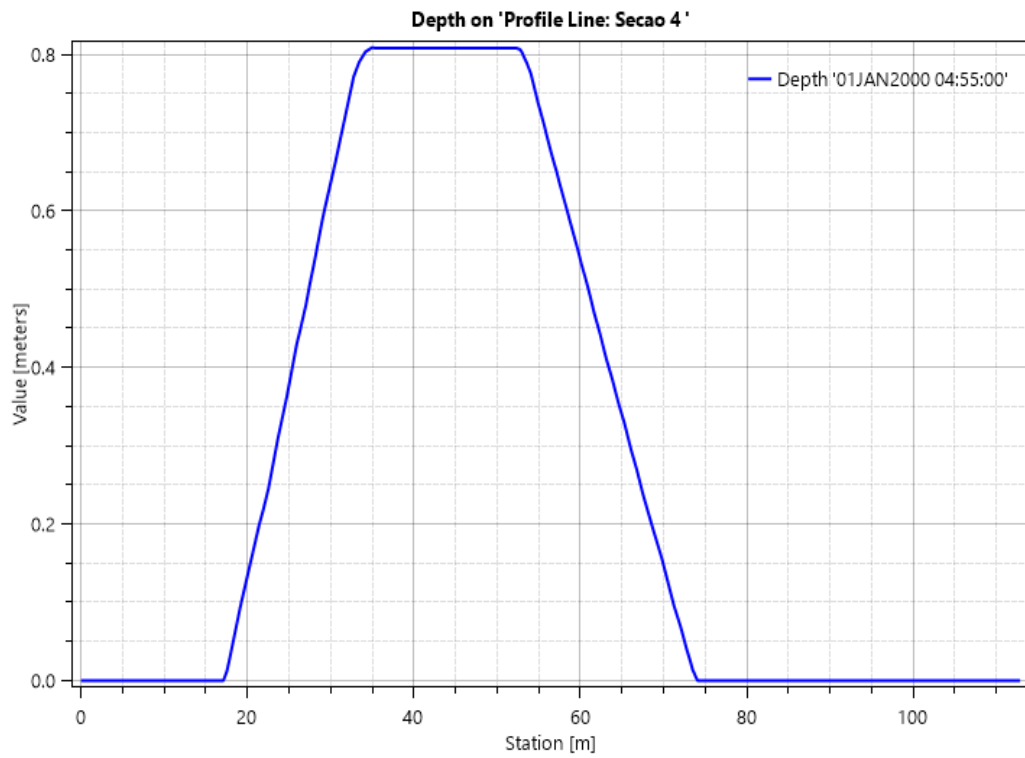
A Seção 4 localiza-se a 400 m da Seção 3, ainda na Rua Dr. Álvaro Camargo.

Figura 40 – Perfil do terreno (Seção 4)
Terrain Profile on 'Profile Line: Secao 4'



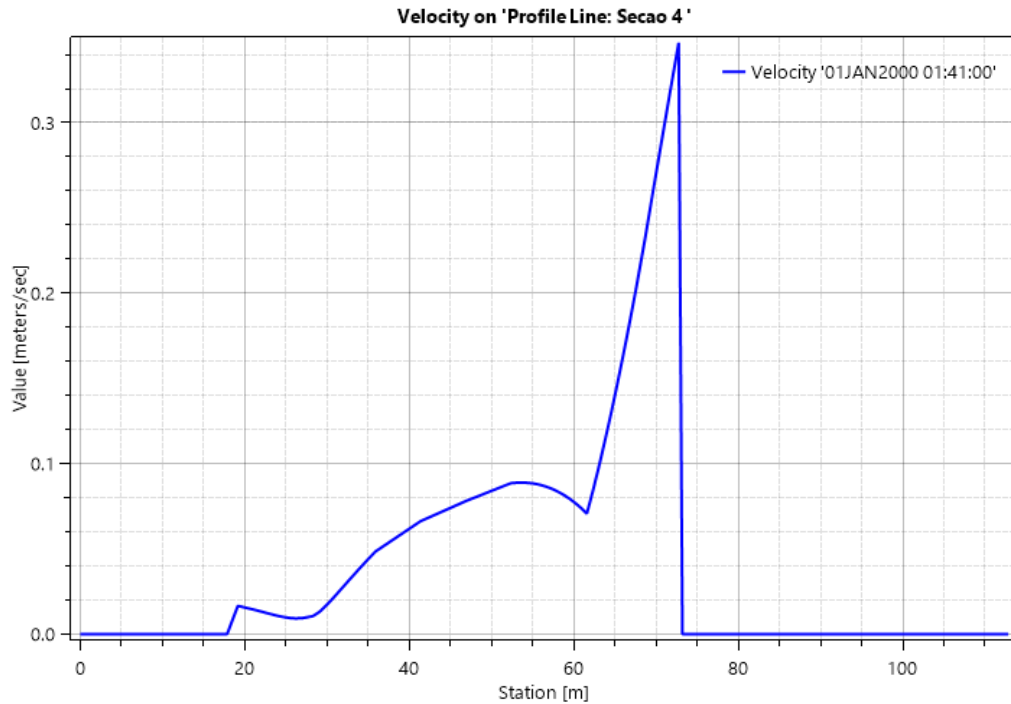
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 41 – Profundidade da água (Seção 4)



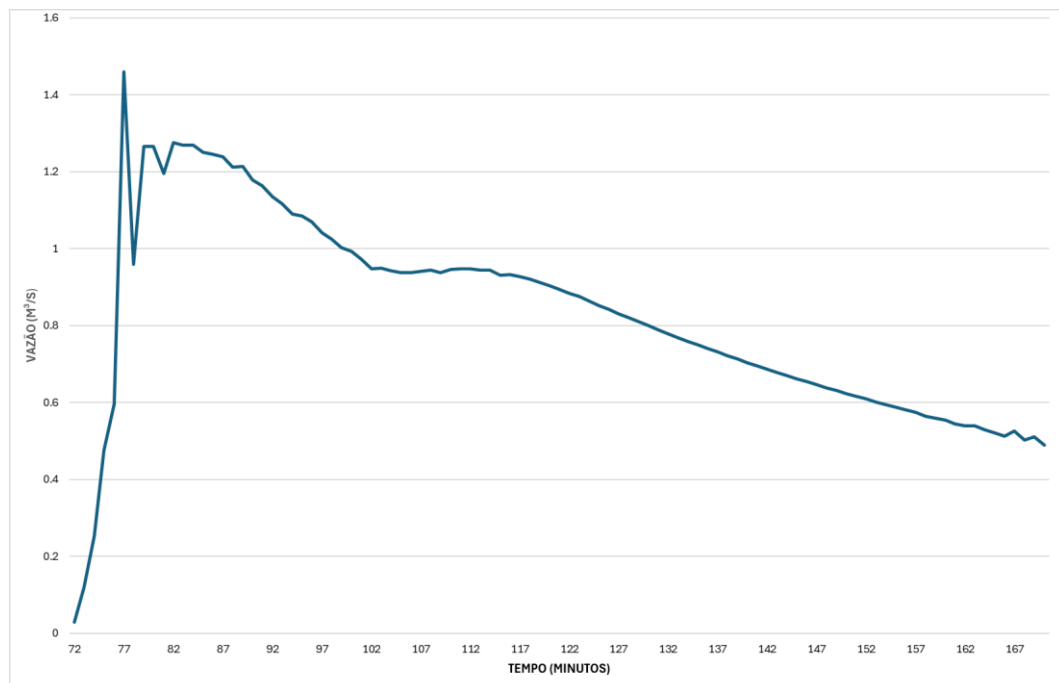
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 42 – Velocidade da água (Seção 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 43 – Hidrograma da onda de cheia (Seção 4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

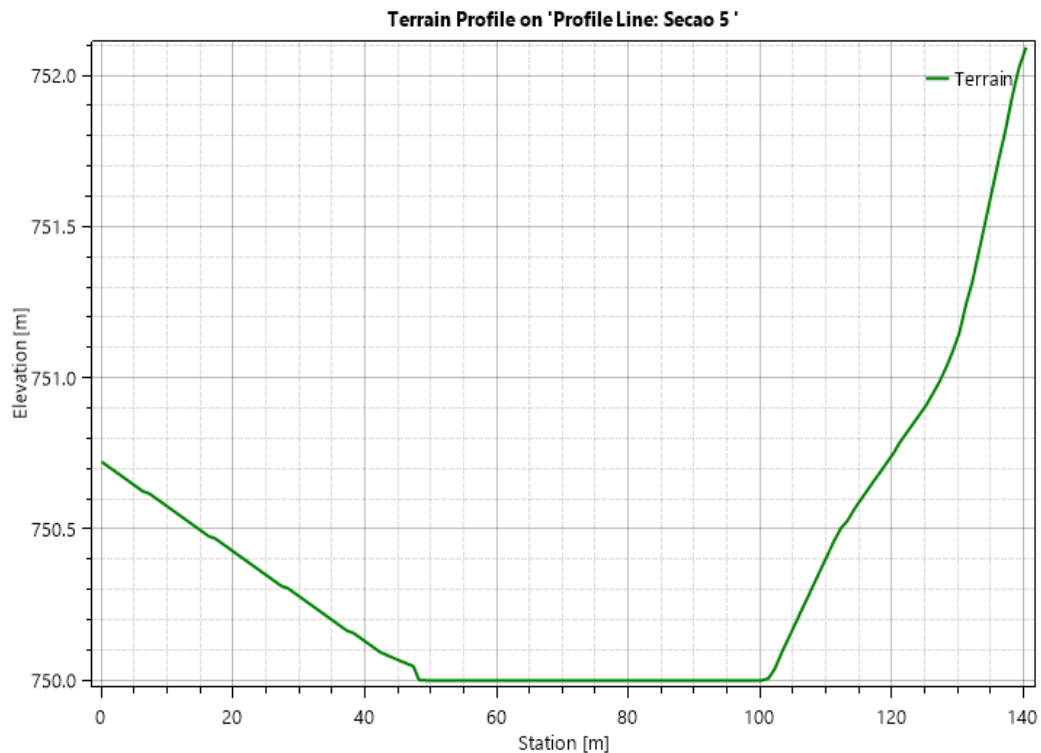
Ao contrário da anterior, a topografia desta seção caracteriza-se por cotas mais baixas, em sua região central, exatamente nas vias de tráfego, e cotas mais elevadas nas extremidades, exposto pela Figura 40. Com isso, a profundidade da água alcançou 80 cm, no momento da

cheia máxima, de acordo com a Figura 41, o que pode ser considerado um alagamento considerável para uma via. O hidrograma demonstra um valor de máximo de aproximadamente $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo que a inundação atingiu a região 71 minutos após a ocorrência da ruptura, e levou cerca de 4 horas para que fosse amortecida, conforme Figura 43. A velocidade, Figura 42, acompanhou o comportamento da vazão e também reduziu tendo em vista a seção 3.

6.6 Seção 5

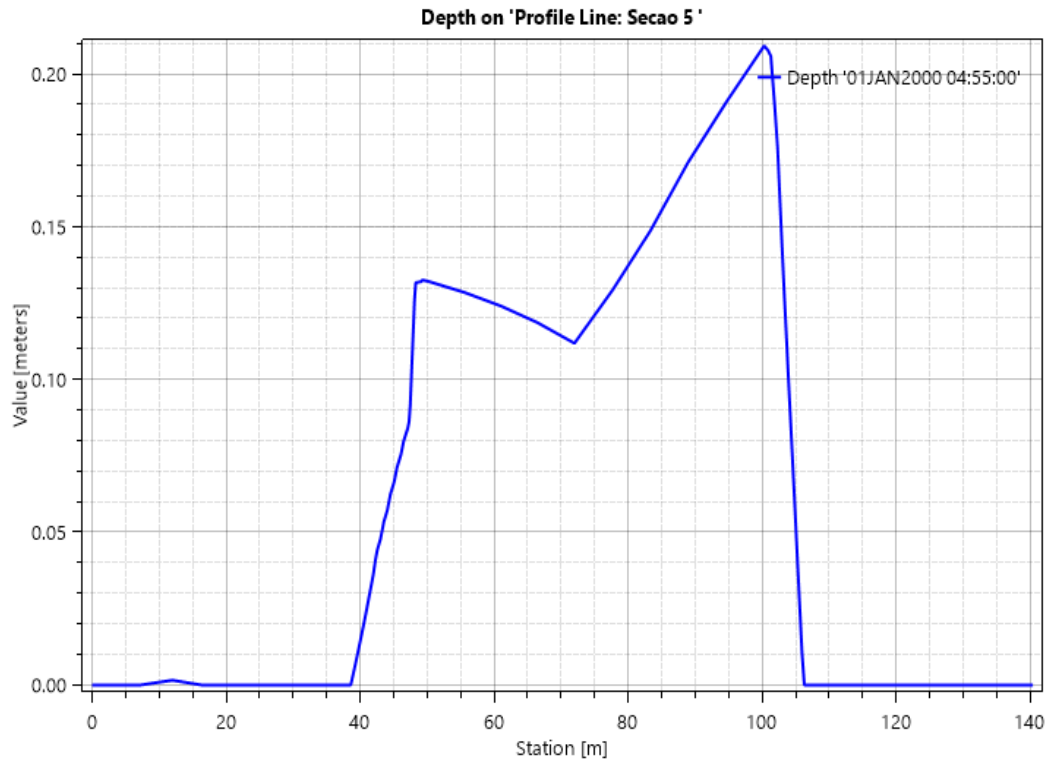
A penúltima seção localiza-se na Avenida Vilarinho, onde hoje está locada a caixa de captação de cheia. Vale destacar que o MDT utilizado é anterior às obras da estrutura, sendo assim, é correto afirmar que a topografia da região sofreu alterações e isso poderia levar resultados diferentes ao obtido, apesar de já ser o trecho final da mancha de inundação. Vale destacar que o HEC-RAS possibilita a edição e representação da caixa de captação, entretanto isto não foi realizado pois seriam necessários informações de projeto de tal estrutura.

Figura 44 – Perfil do terreno (Seção 5)



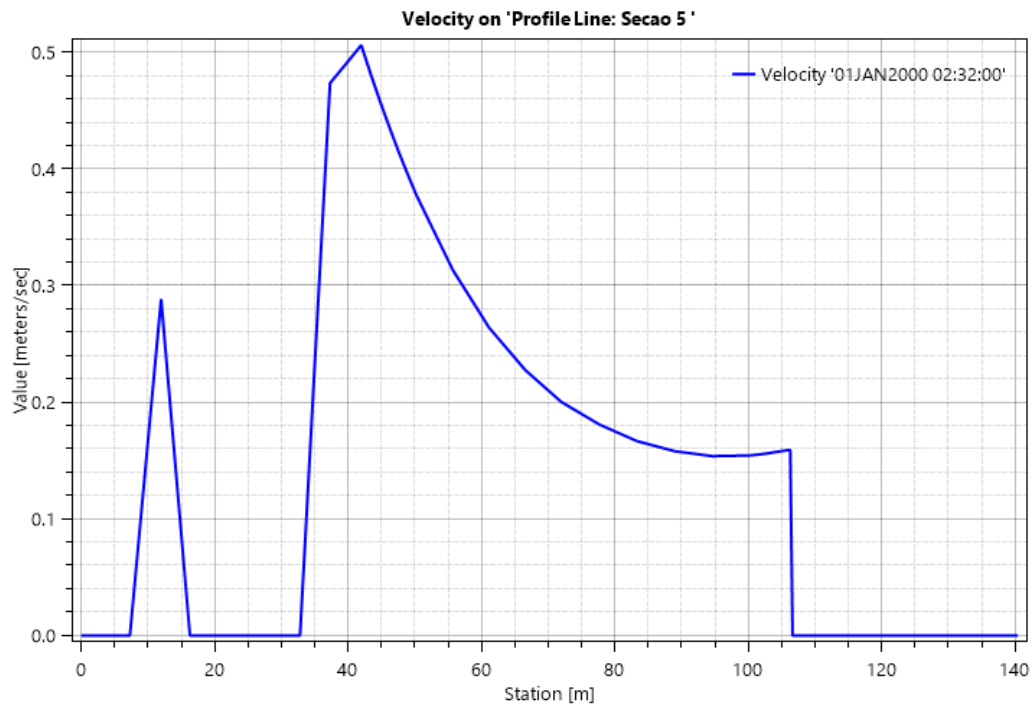
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 45 – Profundidade da água (Seção 5)



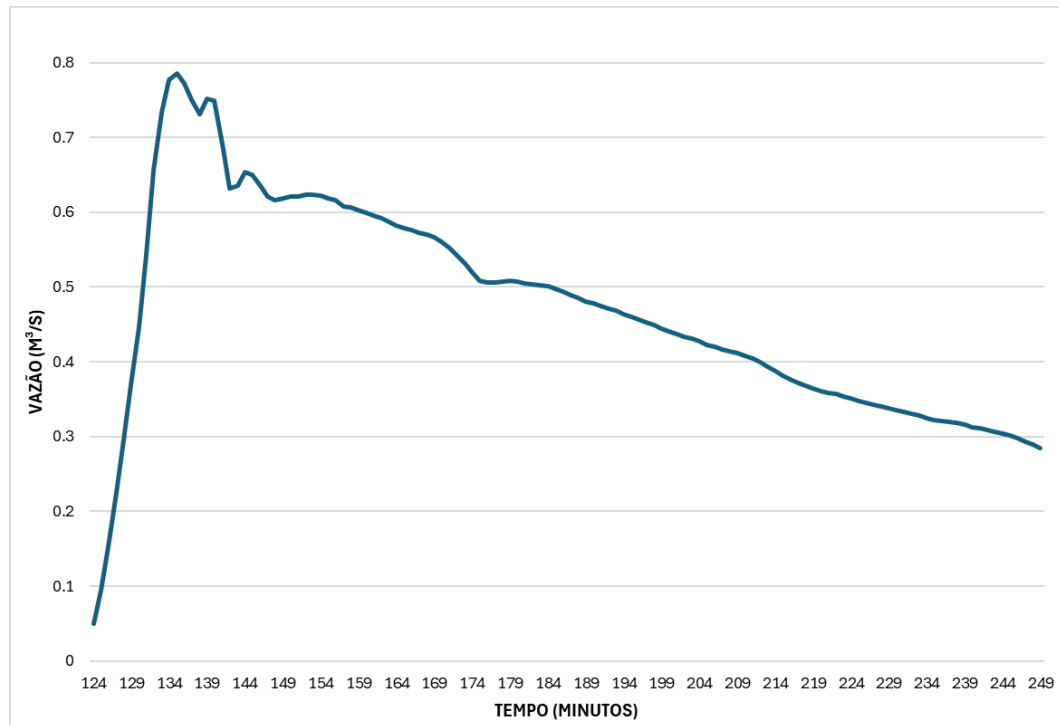
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 46 – Velocidade da água (Seção 5)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 47 – Hidrograma da onda de cheia (Seção 5)



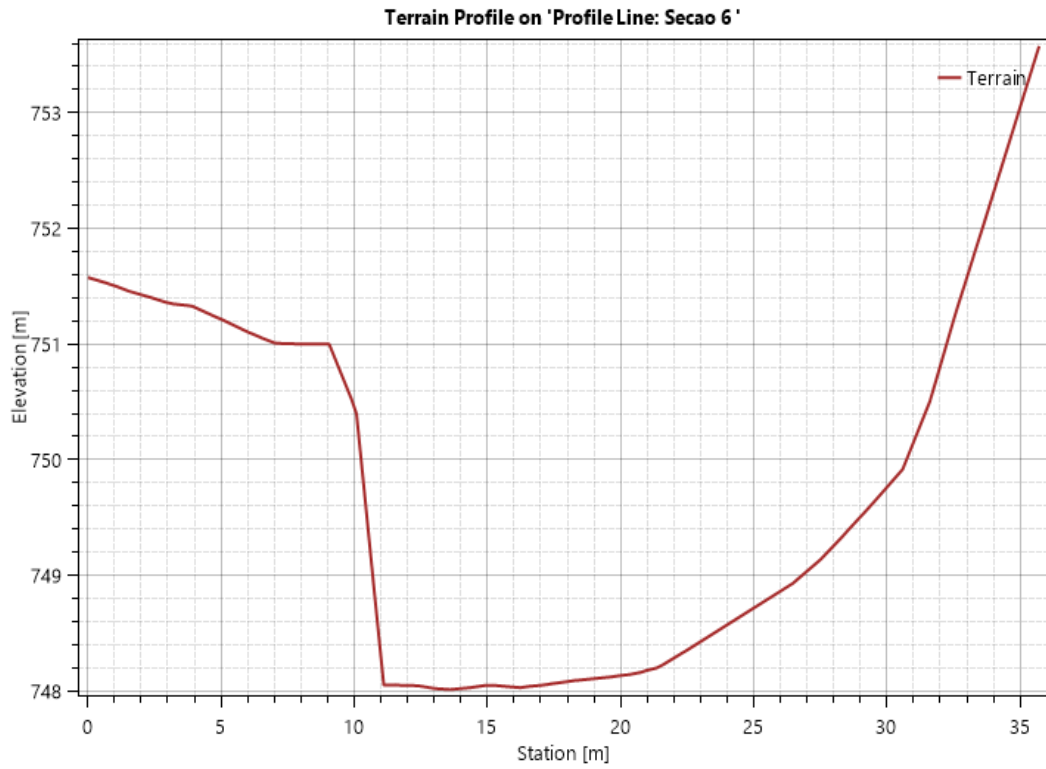
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Foi necessário realizar a mesma modificação da Seção 2, para que o escoamento continuasse a ocorrer de forma mais contínua possível, afetando principalmente os gráficos de profundidade e velocidade (Figura 45 e Figura 46). Apesar disso é correto afirmar que a profundidade máxima certamente atingiu de 12 a 20 cm. Já no hidrograma de cheia, Figura 47, o amortecimento continua acontecendo, observando-se que a região foi alagada cerca de duas horas após o rompimento da barragem, atingindo o valor máximo de vazão de apenas 0,8 m³/s.

6.7 Seção 6

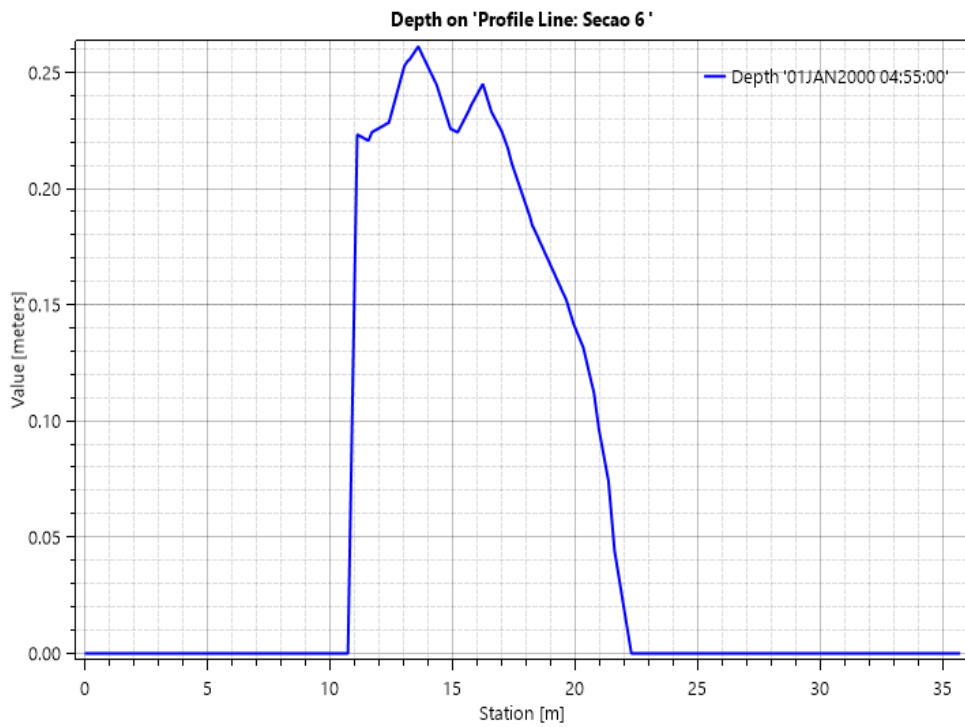
A última seção localiza-se também na Avenida Vilarinho, próximo ao Shopping Estação, no acesso à Avenida Cristiano Machado.

Figura 48 – Perfil do terreno (Seção 6)



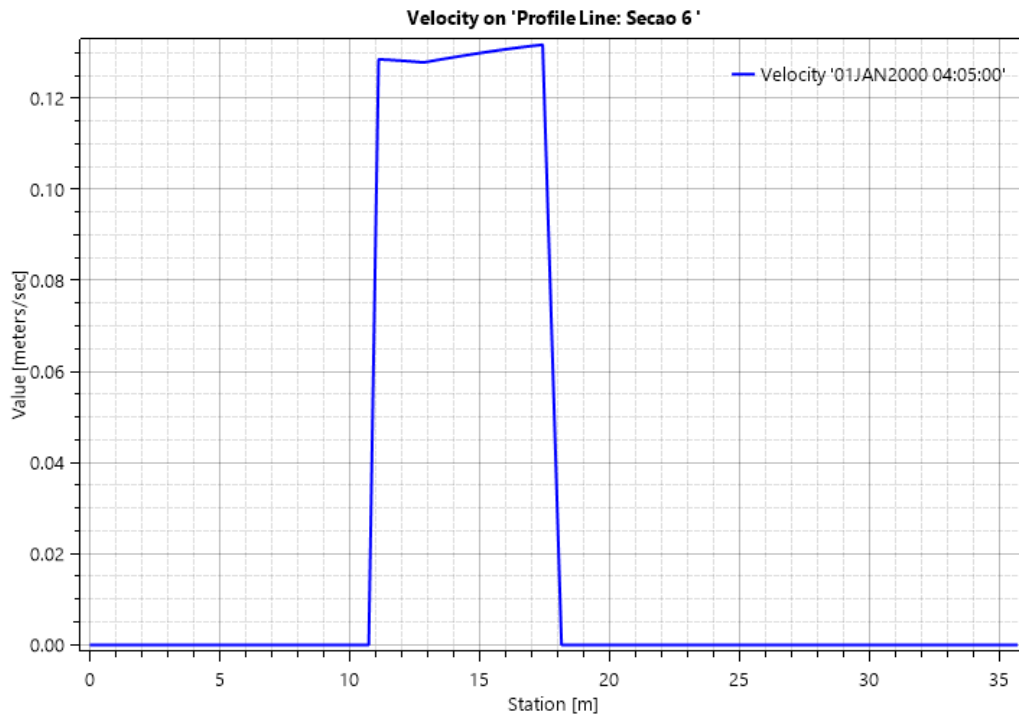
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 49– Profundidade da água (Seção 6)



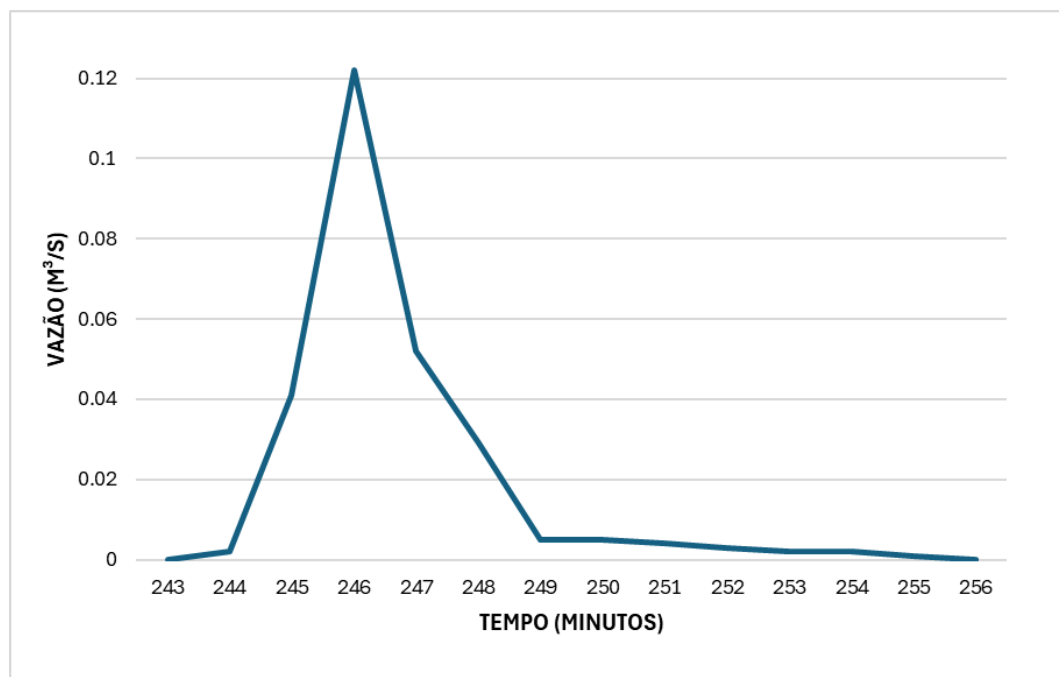
Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 50 – Velocidade da água (Seção 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Figura 51 – Hidrograma da onda de cheia (Seção 6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio do *software* HEC-RAS

Por se tratar do trecho final da mancha de inundação, os resultados obtidos e apontados pelas Figura 49, Figura 50 e Figura 51 refletem dados poucos significativos, principalmente no que se diz respeito ao hidrograma de cheia, apresentando um valor máximo de apenas 0,12 m³/s. Entretanto, observa-se o fato de a região ser atingida pela inundação após quatro horas do rompimento. O rápido amortecimento, cerca de 10 minutos, caracteriza o final da mancha de inundação.

6.8 Resumo das seções

A Tabela 7 apresenta o resumo dos resultados obtidos pelas seções.

Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos

Seção	Distância da barragem (Km)	Tempo para o pico (min)	Vazão de pico (m ³ /s)	Lâmina d'água (m)
1	0,14	14	107	4,00
2	0,36	25	5,20	2,90
3	0,84	50	2,10	0,30
4	1,30	81	1,28	0,80
5	1,60	135	0,78	0,15 – 0,20
6	1,80	246	0,12	0,26

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

6.9 Análise dos resultados

Após a exposição dos resultados, torna-se possível fazer análises que auxiliam no esclarecimento de certos pontos sendo possível criar relações com fatos que ocorreram no dia da ruptura da barragem. Apesar de não haver informações consolidadas acerca das regiões atingidas ou uma análise dos dados hidráulicos-hidrológicos do evento (nem mesmo no relatório disponibilizado pela SMOBI), impedindo uma comparação direta.

Entretanto, algumas reportagens auxiliam de certa forma na validação de alguns dos resultados atingidos. Conforme noticiado por diversos veículos de imprensa (Gazeta, 2024; O Tempo 2024; Itatiaia 2024), a água do reservatório atingiu a Avenida Dom Pedro I, causando a interdição do trecho e gerando um congestionamento de 8 Km, conforme demonstrado pela Figura 52. Isso atesta a presença do escoamento por toda a região das Seções 1 e 2.

Figura 52 – Congestionamento na Avenida Dom Pedro I devido ao rompimento



Fonte: Itatiaia Minas Gerais (2024)

Além disso, segundo Villela (2024), Brasil de Fato MG, especialistas relataram que o rompimento alagou avenidas próximas ao parque e foi responsável pelo transbordamento da bacia de retenção de chuvas da Avenida Vilarinho. Comprovando tal fato, Abalen (2024), de O Tempo Cidades, registrou o transbordamento da estrutura de captação, conforme demonstrado pela Figura 53. Isso confirma que, além da forte chuva, o rompimento pode ter tido um papel fundamental no alagamento da Avenida Vilarinho, onde foi posicionado a Seção 5. Um fato interessante é que a bacia de retenção possui um volume de cerca de 10.000 m³, ou seja, cerca de 13% do volume de água presente no reservatório, já seria o suficiente para o total transbordamento da bacia.

Figura 53 – Alagamento da Avenida Vilarinho



Fonte: O Tempo Cidades (2024)

Além do mais, o modelo seguiu corretamente alguns comportamentos previamente esperados, como o correto amortecimento da cheia pelas seções, com os dados de vazão diminuindo de acordo com o aumento da distância para a barragem, além da variação das profundidades de acordo com o perfil topográfico das regiões.

Também é possível notar a diferença da velocidade de escoamento em uma região totalmente arborizada e outras completamente asfaltadas, seguindo a relação inversamente proporcional entre velocidade e rugosidade do solo, como exemplo a seção 1 que é totalmente arborizada e a seção 2 que é asfaltada, apesar de estarem próximas.

A mancha de inundação real provavelmente foi maior do que a gerada pelo *software*, pois, nas simulações, não foram consideradas as vazões dos cursos d'água contribuintes presentes em toda a região a montante. É importante ressaltar que o presente rompimento hipotético considerou apenas o galgamento, não sendo levados em conta os efeitos diretos da precipitação. Estas questões podem ser trabalhadas em futuros estudos.

Os cortes realizados próximos às regiões das Seções 2 e 5 podem indicar uma certa imprecisão do MDT, principalmente no que diz respeito à Seção 2. Nesta região, a via Dom Pedro I encontra-se em elevações similares em relação à região de divisa do Parque Lagoa do Nado; entretanto, pelo MDT, há uma diferença considerável, o que gerou uma descontinuidade na mancha de inundação que não é factível. Sendo assim, a edição realizada na topografia para obter uma condição mais próxima à realidade fez-se necessária para contornar tal situação.

Outro fato que aponta para possíveis imprecisões do MDT são as demais descontinuidades do mapa de inundação. Isso pode ser justificado pela dificuldade de geração de um modelo digital em meio a uma cidade que apresenta casas, galpões e viadutos, ou seja, inúmeras interferências para que as elevações do terreno sejam levantadas de forma completamente precisa.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O rompimento de uma barragem é fenômeno que acarreta diversos impactos na área de jusante da estrutura. Apesar da atuação de órgãos fiscalizadores e legislações bem definidas, eventos dessa natureza ainda ocorrem por variados motivos e modos de falhas. Exemplo disso foi o caso da Barragem Parque Lagoa do Nado, em novembro de 2024, em Belo Horizonte / MG, que, mesmo sob inspeções rotineiras e consultoria especializada, rompeu por um galgamento.

O estudo de rompimento hipotético é de suma importância para mapear as áreas alagadas e definir as rotas de fuga e ponto de encontro, conforme estabelecido pelo Plano de Ação de Emergência (PAE). Mesmo em estruturas onde o rompimento já ocorreu, o estudo permanece útil para calibrar os dados de entrada, uma vez que permite trabalhar com informações consolidadas em vez de cenários hipotéticos ou baseados pelo “pior cenário”. Sendo assim, o presente trabalho de conclusão de curso buscou analisar os impactos do rompimento da Barragem do Parque Lagoa do Nado através de uma simulação hidráulica no *software* HEC-RAS 2D.

Ao desenvolver a propagação da onda de cheia, foram obtidas as áreas afetadas pela inundação, a partir disso traçou-se seções transversais para a obtenção dos dados de forma a cumprir com os objetivos específicos traçados no item 2.2, sendo que, a brecha de ruptura e o hidrograma de ruptura fizeram parte da metodologia para inserção no *software*.

A mancha de inundação atingiu uma área de cerca de 10,23 ha, estendendo-se por quase 3 km e afetando entre 45 a 55 edificações, além de uma área considerável do Parque Lagoa do Nado. Outra forma de análise dos resultados é através das seções transversais traçadas ao longo da mancha de inundação, sendo possível observar o amortecimento da onda de cheia, a variação da profundidade da água de acordo com o perfil topográfico e a variação da velocidade em função da rugosidade do terreno.

É importante salientar que a simulação não considerou a cheia do reservatório causada pela precipitação, nem a contribuição de cursos d’água montante e suas respectivas cheias. Sendo assim, para estudos futuros, recomenda-se refazer as simulações integrando tais variáveis hidrológicas, além de realizar uma análise mais detalhada da brecha de ruptura, com intuito de identificar suas reais dimensões e tempo de formação, visando de obter um hidrograma de ruptura totalmente condizente com o evento real.

REFERÊNCIAS

A.Atallah, Tony. A REVIEW ON DAMS AND BREACH. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.

ABALEN, Isabela. Rompimento de barragem no Lagoa do Nado: talude cedeu por impacto da chuva, diz Bombeiros. O Tempo, Belo Horizonte, 13 nov. 2024. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/2024/11/13/rompimento-de-barragem-no-lagoa-do-nado-talude-cedeu-por-impact>. Acesso em: 2 mar. 2026.

ABALEN, Isabela. Vídeo: temporal enche bacia de 10 milhões de litros em Venda Nova, e Vilarinho alaga em BH. O Tempo, Belo Horizonte, 13 nov. 2024. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/2024/11/13/video--temporal-enche-bacia-de-10-milhoes-de-litros-em-venda-nov>. Acesso em: 2 mar. 2026.

AB GHANI, A. *et al.* Revised equations for Manning's coefficient for sand-bed rivers. International Journal River Basin Management, v.5, n.4, p.329–346, 2007.

AGUIAR, D. P. O. Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens – ISB. Dissertação de Mestrado, UNICAMP. Campinas, 2014. 44 p.

ALMEIDA, A. B. Emergência e gestão do risco. In: Curso de Exploração e Segurança de Barragens. Capítulo 7. Lisboa: Instituto Nacional da Água (INAG), 2001. 104p.

BALBI, D. A. F. Metodologia Para A Elaboração de Planos de Ações Emergenciais Para Inundações Induzidas Por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti – MG. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG. Belo Horizonte, 2008.

BAPTISTA, M. B.; LARA, M. M. Hidráulica Aplicada. Porto Alegre: Coleção ABRH, 2001. 619 p.

BARBOSA, Leonardo Carlos *et al.* Digital Land Model obtained by RPA to calculate the volume of land in hills. The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 1-9, 2021. DOI: 10.18540/jcecv7iss1pp12035-01-09e.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 20 set. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 30 set. 2020.

BRASIL, L. S. S. Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem: Estudo de caso: Barragem de Rio de Pedras – MG. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Minas Gerais, 2005.

CAPELLINI, Nathalia. Hidrelétricas no Brasil: o clima e a herança da ditadura. História da Ditadura, [s. l.], 19 jan. 2022. Disponível em: <https://www.historiadaditadura.com.br/post/hidreletricasnobrasiloclimaeaherancadaditadura>. Acesso em: 30 set. 2025.

CHOW, V. T. Open Channel Hydraulics. Estados Unidos: Mcgraw-hill Book Company, 1959. 680 p.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Porto Alegre, 1997. 194 p.

CORN, Aimee. How structural engineers maintain dam safety and vitality. GFT, [s. l.], 19 out. 2023. Disponível em: <https://gftinc.com/blog/how-structural-engineers-maintain-dam-safety-and-vitality/>. Acesso em: 27 fev. 2026.

COUTINHO, M. M. Avaliação do Desempenho da Modelagem Hidráulica Unidimensional de Eventos de Inundação em Colatina / ES. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, 2015. 24 p.

COSTA, J. Floods from dam failures. Denver: 1985. 59 p.

FAN, F. M. *et al.* Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 4, p.137-147

FARIA, F. L. F.; REIS, M. M. Metodologia para Obtenção do Hidrograma para Simulação de Ruptura de Barragens. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis, 2017. 5 p.

FERLA, R. Análise de aspectos hidráulicos de métodos simplificados envolvendo rompimento de barragens. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

FROEHLICH, D. C. Peak outflow from breached embankment dam. Journal of Water Resources Planning and Management, p. 90-97, 1995.

FROEHLICH, D. C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering, p. 1708-1721, 2008.

GOMES, J. *et al.* Investigação da Influência dos Parâmetros Definidores da Formação da Brecha de Ruptura de uma Barragem Sobre o Hidrograma de Cheia a Jusante. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu 2015. 3 p.

GOODELL, C. 1D? 2D? or 1D/2D? How Should I Build my Model? The RAS Solution, 2016. Disponível em: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/1d-2d-or-1d-2d-how-should-i-build-my-model/>.

Grupo Nec amplia portfólio com a inauguração da CGH BRC. NEC Energia, [s. l.], 20 ago. 2025. Disponível em: <https://necenergia.com.br/?p=4006>. Acesso em: 27 fev. 2026.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). World Register – General Synthesis. 2020. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp. Acesso em: 07 Jul 2025.

JANSEN, R. B. Dams and Public Safety: A Water Resources Technical Publication. Denver: 1983. 345 p.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente- uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Ed. Parêntese. São Paulo. 2009

JÓNATAS, R. J. L. Rotura de barragens por galgamento – Ensaio experimentais com aterros homogêneos. Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa. Lisboa, 2013. 40 e 40 p.

KIPPER, P. M. Avaliação de ruptura hipotética de barragens com diferentes metodologias e parâmetros de entrada: estudo de caso Barragem do Salto, RS. 84 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Engenharia Hídrica, UFRGS, Porto Alegre, 2022.

LARA, Pedro Guilherme de. Metodologia probabilística de previsão de brecha de ruptura de barragens. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LAURIANO, A. W. Estudo de ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, 2009.

Li, Z.; Zhang, J. Calculation of field manning's roughness coefficient. Agricultural Water Management, v.49, n.2, p.153-161, 2001.

LYRA, G. B. *et al.* Coeficiente de rugosidade de Manning para o Rio Paracatu. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – UAEEA / UFCG. Campina Grande, 2009. 343 p.

MACDONALD, Thomas C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, Jennifer. Breaching Characteristics of Dam Failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, [S. l.], v. 110, n. 5, p. 567-586, maio 1984.

MASCARENHAS, F. C. B. Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.

MATONI, A. M.; LESSA, R. C. Modelagem hidrodinâmica do canal do rio Paraná, trecho Porto São José – Porto 18. Parte I: Caracterização física do canal. *Acta Scientiarum*, v.21, n.4, p.949-959, 1999a.

MELO, J. F. de. Dam-Break Flood Risk Assessment. Second International Dam World Conference. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Lisboa, Portugal, p. 47 – 56, 2015.

MORRIS, M. W. (2000). CADAM – Concerted Action on Dambreak Modelling – Final Report.

OLIVEIRA, C. V.; JABUR, A. S. Estudo do Coeficiente de Manning para diferentes Materiais em Canal. X Seminário de Extensão e Inovação – UTFPR – Câmpus Toledo. Toledo, 2020. 2 p.

OLIVEIRA, N. C. C. A Grande Aceleração e a Construção de Barragens Hidrelétricas no Brasil. Centre d’Histoire Culturelle des Sociétés Contemporaines Université de Versailles Saint-Quentin. França, 2018. 20 p.

REIS, R. J. P. *et al.* Inspeção visual e instrumentação de barragens. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2010.

Resende ganhará nova linha de transmissão na Usina de Funil. *Jornal Beira-Rio*, [s. l.], 13 ago. 2021. Disponível em: <https://jornalbeirario.com.br/portal/?p=78104>. Acesso em: 26 fev. 2026.

RODRIGUES, Fernanda; MEIRELLES, Jovana. Após Lagoa do Nado romper, avenida Pedro I é fechada por risco de alagamento. Itatiaia, Belo Horizonte, 13 nov. 2024. Disponível em:

<https://www.itatiaia.com.br/cidades/2024/11/13/apos-lagoa-do-nado-romper-avenida-pedro-i-e-fechada-por-risco-de-alagamento>. Acesso em: 2 mar. 2026.

ROMPIMENTO de Barragem no Parque Lagoa do Nado em BH Gera Inundações e Interdição. Gazeta de Varginha, Varginha, 14 nov. 2024. Disponível em: <https://www.gazetadevarginha.com.br/post/rompimento-de-barragem-no-parque-lagoa-do-nado-em-bh-gera-inundações-e-interdição>. Acesso em: 2 mar. 2026.

RUBÍ, A. M. Clasificación de presas y evaluación del riesgo con programa HEC-RAS. Barcelona, 2006. Tesina (Enginyeria hidràulica, marítima i sanitària: Embassaments i preses) - Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental - Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.

SILVA, R. S. A. *et al.* Acidentes e Incidentes em Barragens Brasileiras: Uma Análise dos Dados Disponíveis nos Relatórios de Segurança de Barragens e da Legislação Vigente. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021. 2 p.

TOMAZ, Plínio. Falhas em Pequenas Barragens: Curso de Manejo de águas pluviais. 2013. 23 p.

TSCHIEDEL, A. F. *et al.* Barragens e Rompimentos: Compilação Histórica Nacional e Internacional. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, 2019. 2; 6 p.

TRINDADE, E. G. B. MDE, MDT e MDS: Modelos Geoespaciais e Suas Aplicações. Belo Horizonte: GeoSense, 30 ago. 2024. Disponível em: <https://qas.geosense.com.br/2024/08/30/mde-mdt-e-mds-modelos-geoespaciais-e-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 04 ago. 2025.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS, River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 1. Davis: 1995a.

USACE – U. S. Army Corps of Engineers. Using HEC-RAS for *Dam break* studies. Hydrologic Engineering Center. Washington: 2014. 74 p

USÓ, Maurílio. Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do Rio Bauru, Bauru, SP. 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, 2020.

VASCONCELOS, A. J. L. Barragens: Conceitos e Tipos. Brasília: Edição do Autor, 2006.

VON THUN, J. L.; GILLETTE. D. R. 1990, Guidance on Breach Parameters, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado: 1990, 17 p.

VILLELA, Flora. Mais de 10 dias após rompimento na Lagoa do Nado (BH), ainda não se sabe o impacto exato. Brasil de Fato MG, Belo Horizonte, 27 nov. 2024. Disponível em: <https://brasildefatomg.com.br/2024/11/27/mais-de-10-dias-apos-rompimento-na-lagoa-do-nado-bh-ainda-nao-se-sabe-o-impacto-exato/>. Acesso em: 2 mar. 2026.

VON THUN, J. L.; GILLETTE. D. R. 1990, Guidance on Breach Parameters, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado: 1990, 17 p.

XIONG, Yi (Frank). *A Dam Break Analysis Using HEC-RAS*. Journal of Water Resource and Protection, [S. l.], v. 3, n. 6, p. 370-379, jun. 2011.

ZUFFO, M. S. R. Metodologia Para Avaliação da Segurança de Barragens. Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005. 103 p.