



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA



BIANCA DOS SANTOS VON AHN

**EXPERIMENTOS FÍSICOS DE BARRAGENS DE TERRA
HOMOGÊNEA SUJEITAS AO GALGAMENTO**

Porto Alegre
Setembro de 2023

BIANCA DOS SANTOS VON AHN

**EXPERIMENTOS FÍSICOS DE BARRAGENS DE TERRA
HOMOGÊNEA SUJEITAS AO GALGAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO
AO INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRA HÍDRICA.

Orientador: Rafael Manica

Porto Alegre
Setembro de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Von Ahn , Bianca
Experimentos Físicos de Barragens de Terra
Homogênea Sujeitas ao Galgamento / Bianca Von Ahn . --
2023.
137 f.
Orientadora: Rafael Manica.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Barragem . 2. Rompimento de Barragem. 3. Brecha
de Ruptura. 4. Modelagem Física. 5. Análise de
Semelhança. I. Manica, Rafael, orient. II. Título.

BIANCA DOS SANTOS VON AHN

**EXPERIMENTOS FÍSICOS DE BARRAGENS DE TERRA
HOMOGÊNEA SUJEITAS AO GALGAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 01/09/2023 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

BANCA EXAMINADORA

.....

Prof. Dr. Rafael Manica

(UFRGS)

Departamento de Hidromecânica e Hidrologia

.....

Eng Msc. Danrlei de Menezes

(UFRGS)

Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

.....

Eng Msc. Túlio Machado Humberto Guimarães

(UFRGS)

Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

.....

Conceito: A

Explicar toda a natureza é uma tarefa difícil demais para qualquer homem ou para qualquer época. É muito melhor fazer um pouco e com certeza e deixar o resto para os outros que vêm depois de você.

Isaac Newton

Dedico este trabalho a todos que acreditam
na educação como instrumento de
transformação da sociedade.

Agradecimentos

Agradeço por ter toda estrutura necessária para realizar este trabalho que me dará o título de Engenheira Hídrica que foi conquistado com muita dedicação, esforço e empenho. Considero minha trajetória na UFRGS de muita evolução e sinto que existe uma Bianca antes e após a graduação. Estar inserida ao redor de pessoas extremamente qualificadas me deu a segurança e a confiança de que poderia conquistar tudo que quisesse. Sendo, anteriormente, estudante de escola pública nunca me imaginaria ter a possibilidade de ingressar e me manter em uma universidade renomada como a UFRGS, mas teimosa e persistente do jeito que sou, finalizo esta etapa. Nada disso seria possível sem a devida estrutura, ela é a base de tudo, ela é formada de pessoas.

Agradeço a todos os professores que me ensinaram, levo muito mais que os ensinamentos de sala de aula, levo o aprendizado de vida. Agradeço por ter tido a oportunidade de usufruir de uma universidade pública e de ter aproveitado ao máximo todas as oportunidades possíveis (e foram muitas). Em especial, agradeço ao professor Rafael Manica que me orientou e muitas vezes me desafiou a dar o meu melhor. Foi sem dúvida uma peça fundamental e essencial nesta trajetória. Me sinto segura em saber que sempre poderei recorrer a este grande mestre e amigo. Agradeço ao Cristian Schenk por toda ajuda e auxílio desde a época que eu era bolsista até a execução do TCC, agradeço por tornar tudo mais leve com as piadas sem graça cotidianas. Agradeço a Carolina por todos os ensinamentos, pela didática e paciência em passar o conhecimento. Agradeço por incentivar a autônoma e a curiosidade pela pesquisa. Agradeço a toda equipe do NECOD pelo acolhimento e confiança em mim depositados.

Agradeço por todos os colegas que viraram amigos, agradeço por terem feito parte dos meus dias no IPH e por ainda continuarmos juntos. Nada disso teria feito sentido sem as pessoas certas, a estrutura.

Agradeço a minha família, na qual sempre foi compreensível nas minhas ausências e que sempre me apoiou, me manteve forte e confiou no meu potencial, até quando eu mesma duvidava, sem vocês nada seria possível. Agradeço a minha mãe, Luciana, pelo exemplo de vida. Agradeço por me incentivar a ser uma pessoa melhor e batalhar pelos meus objetivos, mesmo quando isso é geograficamente distante. Essa conquista é nossa! Agradeço a minha irmã, Caroline e ao meu irmão Felipe por terem me proporcionado uma infância feliz e divertida, agradeço por vocês serem os meus irmãos e tudo sempre fez sentido por termos crescido juntos. Agradeço ao Bruno, pelos quilômetros que já rodamos, por tudo que já

construímos até aqui e por sempre ter me apoiado. Agradeço por dividir os dias (e as tarefas cotidianas), por caminharmos juntos e por toda compreensão das noites em claro e dos finais de semana que foram dedicados aos estudos. Por fim, meu AUgradecimento (sim, podem me julgar) vai para o bichano mais agitado e com o ronco mais alto, o Bradock. Obrigada por ter sido a companhia que sempre soube o que eu precisava sem precisar dizer uma palavra (porque latidos foram muitos). O Bradock é um PUG que late. Late muito. Para qualquer coisa. Late muito alto. PUGs usualmente não latem, é uma característica da raça, então nunca se limitem as definições impostas. Obrigado por isto.

Agradeço a todos que tornaram isto possível e que estiveram ao meu lado durante a graduação, agradeço por ter uma estrutura com um grau de compactação de 100% e que não é suscetível ao rompimento (sim, um trocadilho clichê).

Resumo

Barragens são estruturas na qual sua construção sempre esteve associada ao benefício que trazem para a sociedade, permitindo o desenvolvimento de atividades essenciais em decorrência de seus múltiplos. Entretanto, essas estruturas estão sujeitas a falhas que podem levar ao seu rompimento. Excepcionalmente, no ano de 2020 foram reportadas 44 rupturas de barragens pela ANA que tiveram, em grande parte, como causa o galgamento, associado a eventos de intensa precipitação. Em sua maioria, esses acidentes ocorreram em barragens de terra. Assim, este trabalho possui como objetivo analisar o efeito de diferentes vazões e tempos de enchimento do reservatório no rompimento por galgamento em barragens de terra homogêneas, utilizando modelagem física. Neste viés, foi construído um modelo reduzido de uma barragem de terra hipotética em que foram realizadas três simulações físicas no qual foi simulado o enchimento rápido e lento do reservatório. O enchimento do reservatório ocorreu em duas etapas (que consistiu em divisões de alturas de níveis da barragem). Esta divisão foi realizada com o objetivo de simular um reservatório que já estava operando com nível d'água máximo na borda livre e depois recebeu um incremento de vazão até a sua ruptura. Os resultados foram coletados através de iPad, cronômetro, medidor de vazão eletromagnético e um medidor de nível instalado no final do canal que registraram, respectivamente, fotos e vídeos, tempo dos processos, vazão e volume injetados e o nível de água correspondente a onda de ruptura ao longo do tempo. Os principais resultados foram em relação a percolação no maciço e as suas deformações, a mensuração da vazão na qual a estrutura rompeu, o tempo que a barragem levou para romper, a origem e evolução da brecha de ruptura, o hidrograma de ruptura e o balanço de massa do material que ficou retido no barramento e o material que foi carregado pela onda de ruptura. Conclui-se que as diferentes distribuições temporais do enchimento do reservatório afetam o rompimento de barragens de terra, principalmente em relação a saturação do maciço. Não é apenas um parâmetro de forma isolada o único responsável pela ruptura e sim um conjunto de parâmetros como grau de compactação, percolação do maciço e origem da brecha. A forma como é realizado o enchimento do reservatório impacta na forma como o maciço vai se comportar e isso contribui diretamente para a formação da brecha. A evolução da brecha de ruptura sofreu significativas deformações nos segundos iniciais após a ruptura.

Palavras-chave: barragem, rompimento de barragem, brecha de ruptura, modelagem física, análise de semelhança.

Abstract

Dams are structures in which their construction has always been associated with the benefit they bring to society, allowing the development of essential activities as a result of their multiples. However, these structures are subject to failures that can lead to their rupture. Exceptionally, in 2020, 44 dam failures were reported by the ANA, which were largely due to overtopping, associated with events of intense tension. Most of these accidents occurred in earth dams. Thus, this work aims to analyze the effect of different outflows and reservoir filling times on failure by overtopping in transparent earth dams, using physical modeling. In this case, a limited model of a hypothetical earth dam was built in which three physical simulations were performed in which the fast and slow filling of the reservoir was simulated. Filling of the reservoir in two stages (which consists of divisions of heights of dam levels). This mission was carried out with the objective of simulating a reservoir that was already operating with maximum water level at the free edge and then received an increase in flow until its rupture. The results were collected using an iPad, a stopwatch, an electromagnetic flow meter and a level meter installed at the end of the channel, which recorded, respectively, photos and videos, process times, injected flow and volume and the water level corresponding to the wave of rupture over time. The main results were in relation to the percolation in the massif and its deformations, the measurement of the flow in which the structure broke, the time that the dam took to break, the origin and evolution of the breach, the hydrograph of rupture and the balance mass of the material that was retained in the busbar and the material that was carried by the rupture wave. It is concluded that there are different temporary distributions of reservoir filling and rupture of earth dams, mainly in relation to the saturation of the massif. It is not just an isolated shape parameter that is solely responsible for the failure, but a set of intervals such as the degree of compaction, percolation of the massif and the origin of the breach. The way in which the reservoir is filled impacts the way the massif will behave and this directly contributes to the formation of the breach. The evolution of the rupture breach suffered serious deformations in the initial seconds after the rupture.

Keywords: dam, dam failure, failure breach, physical modeling, similarity analysis.

Lista de Figuras

Figura 1 - Evolução do número de acidentes por RSB.....	22
Figura 2 – Exemplificação da classificação das barragens que relaciona o tipo de material e método construtivo.	28
Figura 3 – Representação de uma barragem hipotética homogênea de terra ($H < 10$ m). ..	36
Figura 4 – Sistemas de drenos comuns utilizados para barragens de terra.....	41
Figura 5 – Anomalias verificadas em barragens de aterro.	42
Figura 6 - Barragem de aterro galgada, situada no rio Missssouri, EUA.	44
Figura 7 - Evolução de uma brecha provocada por galgamento.	45
Figura 8 - Rompimento de barragem por piping.	46
Figura 9 - Evolução da seção com o passar do tempo no processo de ruptura por <i>piping</i> . .	46
Figura 10 - Imagens após o rompimento da Barragem de Quati.....	47
Figura 11 - Imagem de Coronel João de Sá após a ruptura da Barragem do Quati em Pedro Alexandre.	48
Figura 12 - Maciço de terra com compactação de 95% utilizado para modelagem física em canal de acrílico.	51
Figura 13 - Maciço de terra com compactação de 100% utilizado para modelagem física em canal de acrílico.	51
Figura 14 - Modelos físicos utilizados para os ensaios.	53
Figura 15 - Etapa de construção dos modelos físicos utilizados para elaboração do trabalho do Daniel et al. (2022).	54
Figura 16 -Hidrograma de decaimento parabólico.	57
Figura 17- Fluxograma das etapas do trabalho.....	58
Figura 18- Material utilizado para construção do maciço da barragem.	60
Figura 19 - Curva granulométrica da amostra de solo utilizada (Figura 19a) referente a distribuição do tamanho de grão e Figura 19b referente a distribuição do tamanho de grão acumulado).	60
Figura 20 – Resultados referente ao ensaio Proctor Normal das amostras de solo coletadas <i>in situ</i> . Gráfico a direita corresponde a Amostra 1 e o gráfico a esquerda a Amostra 2.	61
Figura 21 – Correlação entre a altura das barragens que sofreram acidente e os seus respectivos volumes.....	63
Figura 22 - Resumo dos parâmetros considerados para construção do modelo e imagem de representação (sem escala) da barragem.	65

Figura 23 - Canal de acrílico utilizado para realização dos ensaios.....	67
Figura 24 - Croqui da estrutura utilizada.....	68
Figura 25 - Material sendo preparado para utilização.....	70
Figura 26 - Determinação da densidade do solo.....	71
Figura 27- Desenho da geometria do maciço no canal de acrílico.....	72
Figura 28 - Processo da construção do maciço dentro do canal.....	73
Figura 29- Resultado da construção do maciço no canal.....	73
Figura 30 – Granulometria do material na construção do maciço.....	77
Figura 31 - Linha d'água (azul pontilhado) quando chegou na crista da barragem.....	78
Figura 32 - Hidrograma de entrada Ensaio Teste.....	79
Figura 33- Resultado da percolação do maciço com 10:00 min e 20:20 min de enchimento do reservatório (correspondente a primeira etapa 0-7 cm).....	79
Figura 34 – Resultado da percolação da água no maciço até altura de 7 cm (linhas de fluxo a cada 1 minuto).....	80
Figura 35 - Passagem de água para jusante destacada pela linha branca antes do nível d'água atingir a crista.....	80
Figura 36- Comparação do avanço do talude de jusante (linha azul).....	81
Figura 37 - Sequência de imagens da evoluçãoda ruptura por galgarneto do barramento.....	83
Figura 38 – Resultado do maciço após a ruptura e esvaziamento completo do reservatório.....	84
Figura 39 – Divisão realizada no depósito para separar o material retido e carregado.....	85
Figura 40- Granulometria do material na construção do maciço.....	86
Figura 41 - Linha d'água (azul pontilhado) quando chegou na crista da barragem.....	87
Figura 42 - Hidrograma de entrada Ensaio 1.....	88
Figura 43 - Resultado da percolação completa do maciço com 17:25 minutos e com altura aproximada de 8 cm.....	89
Figura 44 - Resultado da percolação da água no maciço até altura de 7 cm (linhas de fluxo a cada 1 minuto).....	89
Figura 45 - Passagem de água para jusante.....	90
Figura 46 – Comparação do avanço do talude de jusante (linha azul) e deformação do maciço para o nível de 9 cm (imagem da direira na qual a deformação está representada pela linha branca).....	91
Figura 47 - Sequência de fotos da ruptura do barramento.....	92

Figura 48 - Resultado do maciço após a ruptura e esvaziamento completo do reservatório.	93
Figura 49- Hidrograma de ruptura Ensaio 1.....	94
Figura 50 - Granulometria do material na construção do maciço.	95
Figura 51 - Linha d'água (azul pontilhado) correspondente a cota de enchimento do reservatório (borda livre).....	96
Figura 52 -Linha d'agua correspondente à altura de 8 cm (distribuída uniformemente no maciço).	96
Figura 53 - Momento em que a linha d'água atinge a crista da barragem.	97
Figura 54 - Hidrograma de entrada Ensaio 2.....	98
Figura 55 – Resultado da percolação do maciço com 07:02 min e 13:40 min de enchimento do reservatório até a á altura de 8 cm.	98
Figura 56 – Percolação da água no maciço até altura de 8 cm (linhas de fluxo a cada 1 minuto).	99
Figura 57 – Passagem de água para jusante.	99
Figura 58 - Comparação do avanço do talude de jusante (linha azul).....	100
Figura 59 - Sequência de fotos da ruptura do barramento.....	101
Figura 60 - Sequência de fotos laterais da ruptura do barramento.	103
Figura 61 - Resultado do maciço após a ruptura e esvaziamento completo do reservatório.	104
Figura 62 – Hidrograma de ruptura Ensaio 2.	105
Figura 63 - Enchimento do reservatório de 0-7cm e 0-8cm.	107
Figura 64 - Enchimento do reservatório de 7-9 cm e 8-9 cm.	108
Figura 65 – hidrograma de ruptura para o Ensaio 1 e Ensaio 2 para o tempo de 100 segundos.	110
Figura 66 - Abertura da brecha para os três ensaios realizados.....	113
Figura 67 - Resultado final da brecha para os três ensaios realizados.	114
Figura 68 - Critérios de enquadramento de barragens na PNSB.....	123

Lista de Quadros

Quadro 1 - Lista com as barragens que mais preocupam o GT Segurança de Barragens da SEMA-RS.....	33
Quadro 2 - Principais elementos de uma pequena barragem de terra.	38
Quadro 3 - Definição e exemplificação das principais anomalias que ocorrem em barragens de terra.	42
Quadro 4- Levantamento bibliográfico de trabalhos realizados de modelagem física em barragens de terra.....	50
Quadro 5 – Relações das escalas derivadas obtidas com o número de Froude.	66

Lista de Tabelas

Tabela 1- Relação dos acidentes que apresentaram como causa o galgamento.	23
Tabela 2 – Fórmulas matemáticas para obtenção da vazão de pico (Qp).	55
Tabela 3 - Possíveis valores a serem considerados para as características das brechas.	56
Tabela 4 - Umidade ótima e densidade máxima aparente da amostra de solo coletada in situ.	61
Tabela 5 - Barragens presentes nos Relatórios de Segurança de Barragens que sofreram acidentes nos anos de 2020 e 2021.	62
Tabela 6 - Equações empíricas para estabelecer a largura da crista barragem.	64
Tabela 7 – Coeficientes de inclinação dos “m : 1V” dos taludes (*).	64
Tabela 8 - Resumo dos valores adotados para o protótipo e modelo.	66
Tabela 9 - Resultado da umidade correspondente ao solo em seu estado natural.	69
Tabela 10 - Caracterização dos ensaios realizados.	74
Tabela 11 - Resultados referentes a caracterização do solo do Ensaio Teste.	76
Tabela 12 - Resultados referentes a caracterização do solo do Ensaio 1.	86
Tabela 13 - Resultados referentes a caracterização do solo do Ensaio 2.	95
Tabela 14 - Resultados dos parâmetros que caracterizam o solo utilizado para cada ensaio.	105
Tabela 15 - Resumo de todos os ensaios realizados.	106
Tabela 16 – Resultado da vazão de pico a partir das Fórmulas matemáticas.	110
Tabela 17 - Valores correspondentes ao modelo e ao protótipo.	116
Tabela 18 - Valores referentes ao tempo de ruptura a partir da literatura.	118
Tabela 19 - Valores referentes ao comprimento da brecha a partir da literatura.	118

Lista de Siglas

ABGR - Associação Brasileira de Gerenciamento de Riscos

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANM - Agência Nacional de Mineração

CNDH - Conselho Nacional dos Direitos Humanos

CRI - Categoria de Risco

DIOUT - Divisão de Outorga

DPA - Dano Potencial Associado

DRHS - Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento

GT - Grupo de Trabalho

ICOLD - *International Commission On Large Dams*

IMASUL - Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul

INEA - Instituto Estadual do Ambiente

PAE - Plano de Ação de Emergência

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

PSB - Plano de Segurança de Barragem

PVC - Policloreto de vinila

RPSB - Revisão Periódica de Segurança de Barragens

RSB - Relatório de Segurança de Barragem

SEMA-RS - Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul

SIOUT RS - Sistema de Outorga do Rio Grande do Sul

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

USBR - *United States Bureau of Reclamation*

Lista de Símbolos

a - escala de área modelo

A_c – largura da crista da barragem (m)

A_s - área do reservatório para o nível de água máximo

B_b - largura final da brecha (m)

B_d - largura da barragem (m)

D - profundidade do fluido

Fr - número de Froude

g - aceleração da gravidade (m/s^2)

H_b - altura final da brecha (m)

H_d - altura da barragem (m)

L - escala de comprimento protótipo

l - escala de comprimento modelo

m - coeficiente de inclinação dos taludes

n - escala

q - escala de vazão modelo

Q - escala de vazão protótipo

Q_p - vazão máxima defluente da barragem em ruptura

t - escala de tempo modelo

T - escala de tempo protótipo

t_b - tempo de base

T_p - tempo para desenvolvimento da brecha

V - velocidade do fluido (m/s)

V_m - volume máximo do reservatório para o nível de água máximo

V_w - volume de água imediatamente antes da ruptura da barragem

$Y_{médio}$ - profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m)

γ - peso específico (N/m^3)

μ - viscosidade dinâmica (Pa.s)

ρ – densidade

ν - viscosidade cinemática (m^2/s)

Sumário

1. INTRODUÇÃO	19
1.2 Delimitação do Tema	21
1.3 Formulação da Questão de Estudo	21
1.4 Justificativa.....	21
2. OBJETIVO DE ESTUDO	26
2.1 Objetivos Gerais	26
2.2 Objetivos Específicos	26
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.3 Barragens e suas Classificações	27
3.1 Aspectos Legislativos	29
3.2 Barragens em Estado de Alerta	30
3.2.1 Segurança de Barragens no Rio Grande do Sul.....	31
3.4 Barragens de Terra.....	35
3.4.1 Barragens de Terra Homogênea ou Zonada.	36
3.4.2 Principais Elementos de uma Barragem de Terra	38
3.4.3 Percolação em Barragens de Terra	40
3.4.4 Anomalias em Barragens de Terra	42
3.4.5 Rompimento de Barragens de Terra.....	44
3.4.6 Acidentes em Barragens de Terra.....	47
3.5 Modelagem Física com Barragens de Terra	49
3.6 Hidrograma de Ruptura	55
4 METODOLOGIA.....	58
4.1 Definição das Características da Barragem.....	59
4.1.1 Material Utilizado.....	59
4.1.2. Geometria da Barragem.....	62
4.1.1 Análise de Semelhança.....	65

4.2 Métodos Aplicados para Realização dos Ensaios.....	66
4.2.1 Estrutura Utilizada para os Ensaios	67
4.2.2 Preparação do Material.....	69
4.2.3 Construção do Maciço no Canal.....	72
4.2.4 Ensaios Realizados	73
4.2.4 Metodologia dos Resultados.....	75
5 RESULTADOS	76
5.1 Ensaio Teste.....	76
5.2 Ensaio 1	86
5.3 Ensaio 2	95
5.1 Discussão - Comparação dos Resultados	105
5.1 Análise de Semelhança.....	115
6.CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	119
7. ANEXOS	122
7.3 ANEXO A	122
7.1 ANEXO B	125
7.2 ANEXO C	130
7.2 ANEXO D	132
7. REFERÊNCIAS	133

1. INTRODUÇÃO

Define-se barragem como 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 de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (Lei nº 12.334/2010).

Barragens são estruturas construídas pelo homem há milhares de anos, que permitiram o desenvolvimento de atividades essenciais e, como consequência, a evolução de cidades e civilizações. As barragens podem ser de diversos tipos e tamanhos e podem possuir diferentes finalidades, como o controle de inundações, represamento de água como fonte de energia hidrelétrica, abastecimento humano, uso industrial e irrigação de lavouras agrícolas, por exemplo (ANA, 2019).

Por volta de 1950, à medida que a população aumentava e as economias nacionais cresciam constatou-se um número cada vez maior de barragens. Pelo menos 45.000 grandes barragens foram construídas para atender demandas de água ou energia. Na entrada do novo século, um terço dos países do mundo dependia de usinas hidrelétricas para produzir mais da metade de sua eletricidade. As grandes barragens eram responsáveis por cerca de 19% de toda a eletricidade do mundo. Metade das 45.000 grandes barragens foram construídas exclusivamente ou primordialmente para fins de irrigação, e cerca de 30% a 40% dos 271 milhões de hectares irrigados no planeta dependiam de barragens. As barragens foram promovidas como um importante meio de atender a necessidades de água e energia e foram vistas como investimentos estratégicos de longo prazo capazes de oferecer múltiplos benefícios (WORLD COMMISSION ON DAMS, 2000).

O objetivo principal da construção de barragens sempre esteve associado com o benefício que estas estruturas trazem para a sociedade. Entretanto, sua construção e operação geram alguns impactos sociais e ambientais negativos. Além de que estas estruturas estão sujeitas a falhas, acidentes (ocasionado pelo colapso parcial ou total da estrutura com liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório) e incidentes (qualquer ocorrência que afete o comportamento da estrutura) que podem levar ao seu rompimento (WORLD COMMISSION ON DAMS, 2000).

Quando uma barragem se rompe ocorre o extravasamento de milhões de metros cúbicos de água (no caso de barragens de rejeito ocorre o extravasamento da mistura de líquidos e sólidos) que escoam o mais rápido possível para jusante, resultando em uma onda com alto potencial de destruição (WYLAM, 2016). Dependendo da localização topográfica

de cada barramento e da quantidade de barramentos próximos, ou em uma mesma região, a onda de ruptura da barragem a montante pode chegar em outros reservatórios de barragens a jusante e causar o seu rompimento (efeito cascata). Essa onda de ruptura carrega materiais (galhos, árvores, pedras, solo, sedimento e lixo) que pode comprometer o funcionamento de cidades e de seu entorno, bem como pode ocorrer também o comprometimento de pontes de pequeno porte, inacessibilidade de estradas, corte de abastecimento de água e luz e em uma situação mais crítica a perda de vida de pessoas e/ou animais.

No Brasil, segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) existem 22.654 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). O sistema é um dos pilares da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) que foi estabelecido pela Lei nº 12.334/2010 e possui como objetivo garantir que padrões de segurança de barragens sejam seguidos, de forma a reduzir a possibilidade de acidentes e incidentes e suas consequências, além de regulamentar as ações e padrões de segurança.

Para controlar isso, periodicamente, a ANA solicita para os órgãos fiscalizadores uma lista de barragens em estado mais crítico visando priorizar ações e prender a atenção do alto escalão da Administração Pública nas diversas esferas do governo. Essa lista abrange barragens que contenham algum comprometimento estrutural importante que impacte a sua segurança, com um breve relato sobre cada uma. Esta relação de barragens não necessariamente apresenta risco de rompimento. Em 2021, foi reportada a existência de 187 barragens de 24 órgãos fiscalizadores que estariam em estado mais crítico. Elas estão distribuídas em 22 estados, com destaque para Minas Gerais (66), Goiás (18), Pará (18) e Pernambuco (15) (ANA, 2022).

Durante o ano de 2021 no Brasil, de acordo com o último Relatório de Segurança de Barragem (RSB) divulgado até o momento, foram relatados 13 acidentes e 37 incidentes em 16 estados, sobretudo na região central do país. A maioria desses eventos ocorreram devido às chuvas intensas, ocasionando o galgamento (transbordamento) das barragens, alguns deles “em cascata” (ANA, 2022). Estes acidentes ocorreram em sua maioria em barragens de terra, no qual a ocorrência de fortes chuvas provocou o aumento do nível dos reservatórios que vieram a romper por não suportar o volume do reservatório. Muitas vezes, esses acidentes, carecem de informações (precipitação e vazão que ocasionaram o rompimento, altura de lâmina d’água em cima da barragem que gerou a ruptura, tempo de rompimento da barragem, da abertura da brecha e do esvaziamento total do reservatório etc.) o que impossibilita a compreensão e caracterização minuciosa destes eventos.

Devido a ocorrência de ruptura por galgamento e a carência de informações dos eventos ocorridos, justifica-se compreender como essas estruturas se comportam em eventos de chuva intensa e como o reservatório, a precipitação e o aumento da vazão contribuem para o galgamento do maciço, buscando entender o comportamento do escoamento e da barragem antes, durante e após o seu rompimento. Busca-se identificar alternativas que resultem em menores consequências para a população e o meio ambiente.

Sendo assim, analisar e estudar o rompimento de barragens de terra por galgamento através de simulações físicas permitirá compreender como a precipitação e aumento da vazão a montante do barramento influenciam na onda de ruptura gerada. Além de permitir observar a ruptura do barramento (formação de brecha ou outras formas de rompimento) e seus efeitos no próprio reservatório e na estrutura da barragem. A partir dessas observações será possível sugerir soluções que contribuam para tomada de decisões para redução dos danos causados pelo rompimento de barragens, o que permitirá que vidas e o meio ambiente sejam preservados.

1.2 Delimitação do Tema

Será simulado o rompimento de barragens de terra por galgamento através de modelagem física. Algumas considerações:

- a) o fluido utilizado nos experimentos será exclusivamente água limpa.
- b) será utilizado fundo fixo.
- c) a barragem hipotética será construída de material homogêneo.

1.3 Formulação da Questão de Estudo

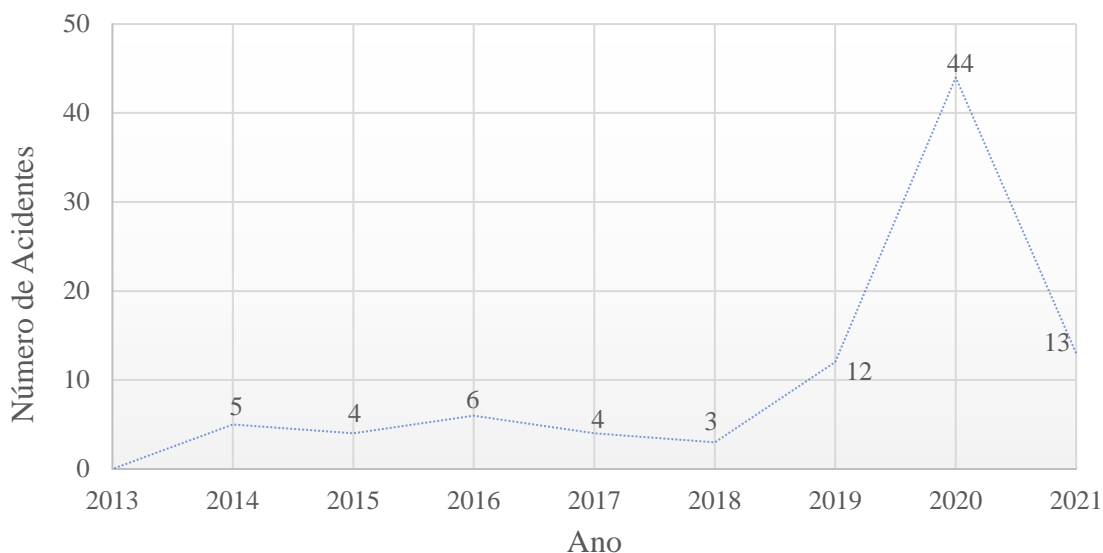
Diferentes distribuições temporais do enchimento do reservatório afetam o rompimento de barragens de terra? Qual a sua contribuição para a evolução da brecha de ruptura?

1.4 Justificativa

A Figura 1 apresenta a evolução do número da ocorrência de acidentes ao longo dos anos no Brasil. No período de abrangência do RSB 2020 e RSB 2021 os acidentes reportados tiveram, em sua maioria, como causa eventos de cheias que ocasionaram o galgamento dessas estruturas e conseqüentemente o seu rompimento, sendo que alguns destes ocorreram em efeito cascata. Em termos de acidentes, os quantitativos observados no ano de 2020

foram excepcionalmente atípicos e superiores aos verificados em todos os anos anteriores. O ano de 2021 vem em sequência como o segundo ano com a maior ocorrência de acidentes (ANA 2020 e 2021).

Figura 1 - Evolução do número de acidentes por RSB.



Fonte: Adaptado do Relatório de Segurança de Barragem. ANA, 2020 e 2021.

Dos 44 acidentes que ocorreram em 2020, 18 destes não possuíam informações suficientes que permitissem identificar a causa do rompimento, pois careciam, muitas vezes, de informações relacionadas a altura, volume e material do barramento. Quatro apresentaram causas distintas de rompimento (como, por exemplo, o solo utilizado para a construção do barramento era inadequado e a intervenção de uma máquina pá carregadeira que estava fazendo manutenção levou ao rompimento). Dez barragens romperam por não suportarem o volume aportado e 12 sofreram galgamento.

No ano de 2021 foram verificados 13 acidentes, dos quais três apresentaram causas distintas de rompimento (colapso da estrutura devido a onda de propagação proveniente de uma barragem de montante, rompimento do talude lateral da barragem e rompimento de um lado da comporta) e 10 acidentes ocorreram devido ao galgamento.

Na Tabela 1 é apresentado um breve resumo dos acidentes que ocorreram nos respectivos anos supracitados e que tiveram como causa o galgamento. É possível verificar as características dessas barragens e o nível de informação disponível para cada uma delas.

Tabela 1- Relação dos acidentes que apresentaram como causa o galgamento.

ANO DE 2020					
Acidente	Local	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Causa
1	Monjolos/MG	20,5	3,95	Terra-Enrocamento	Rompimento devido ao galgamento (cheias históricas verificadas na região).
2	Mata de São João/BA	-	-	Terra	Sofreu galgamento e subsequente erosão do aterro da barragem (fortes chuvas registradas na região).
3	Simões Filho/BA	0,010	-	Terra	Sofreu galgamento e subsequente erosão do aterro da barragem (fortes chuvas registradas na região).
6	Rio Novo do Sul/ES	5	-	Terra homogênea	Barramento apresentava o reservatório operando em nível máximo. Em decorrência das fortes chuvas houve galgamento da barragem.
7	Rio Novo do Sul/ES	4	-	Terra homogênea	Barramento apresentava o reservatório operando em nível máximo. Em decorrência das fortes chuvas houve galgamento da barragem.
8	Rio Novo do Sul/ES	4	-	Terra homogênea	Barramento apresentava o reservatório operando em nível máximo. Em decorrência das fortes chuvas houve galgamento da barragem.
9	Rio Novo do Sul/ES	2,5	-	Terra homogênea	Barramento apresentava o reservatório operando em nível máximo. Em decorrência das fortes chuvas houve galgamento da barragem.
11	Catalão/GO	3	0,0032	Terra homogênea	Barragem recebeu todo volume de uma barragem que rompeu a montante. Rompimento se deu em sua parte central e observou-se indício de galgamento.
12	Catalão/GO	3	0,010	Terra homogênea	Barragem recebeu todo volume de uma barragem que rompeu a montante. Rompimento se deu em sua parte central e observou-se indício de galgamento.
15	Hidrolina/GO	5	0,043	Terra compactada	Rompimento devido ao galgamento - obstruíram o extravassor para a barragem armazenar mais água.

ANO DE 2020					
Acidente	Local	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Causa
20	Sairé/PE	8	0,350	Terra	Rompimento da barragem em função de galgamento.
39	São Sebastião do Umbuzeiro /PB	-	-	-	Galgamento e rompimento de 5 barragens em cascata.
ANO DE 2021					
Acidente	Local	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Causa
1	Godofredo Viana/MA	7	0,16	Terra homogênea	Rompimento causado por galgamento em função da precipitação que ocorreu na região.
2	Juassiapé/BA	7	1,234	Alvenaria de pedra	Galgamento em virtude das fortes chuvas. Houve colapso da porção central da estrutura.
3	Vitória da Conquista/BA	-	-	Terra	Galgamento em virtude das fortes chuvas. Houve colapso da estrutura.
5	Goiatuba/GO	2,5	0,007	Terra homogênea	Galgamento na ombreira esquerda, provocando brecha e liberando o volume de água.
6	Curral de Dentro/MG	7	0,6	Terra	Galgamento próximo da ombreira esquerda provocando brecha e liberando todo o volume de água.
7	Curral de Dentro/MG	5	0,5	Terra	Galgamento na seção central provocando brecha e liberando todo o volume de água.
8	Curral de Dentro/MG	2	0,14	Terra e pedra	Volume de cheia provando galgamento e brecha de abertura.
9	Curral de Dentro/MG	3	0,04	Terra	Galgamento na parte central, provocando brecha e liberando todo o volume armazenado.
10	Curral de Dentro/MG	3	0,04	Terra	Galgamento na parte central, provocando brecha e liberando todo o volume armazenado.
11	Curral de Dentro/MG	3	0,06	Terra	Galgamento na parte central, provocando brecha e liberando todo o volume armazenado.

Fonte: RSB, 2020 e 2021.

Observa-se que os eventos ocorridos, principalmente no ano de 2020, carecem de informações quanto ao volume do reservatório. Ressalta-se que o volume do reservatório é uma das formas de classificação das barragens, visto que a graduação do volume do reservatório está ligada ao dano potencial associado (Lei nº 12.334/2010). Em relação ao tipo de material das barragens pode-se verificar a predominância das barragens de terra, destacando as de terra homogênea.

A partir das informações supracitadas é possível concluir que a maioria dos acidentes ocorreram em barragens de terra e a ruptura se deu por galgamento devido a eventos de elevada precipitação.

Considerando que barragens de terra homogêneas são amplamente utilizadas, justifica-se estudar e compreender esse tipo de obra e os fatores que impactam sua estrutura e operação, principalmente pelo fato de representarem a maioria dos acidentes ocorridos no ano de 2020 e 2021. Ainda, devido a maioria dos acidentes terem ocorrido devido às chuvas intensas que ocasionaram o galgamento dessas estruturas, justifica-se compreender como essas variações de precipitação e, conseqüentemente vazão, impactam o reservatório e causam o galgamento destas estruturas. Essas análises servirão como suporte para o entendimento da formação da brecha de ruptura e da onda de ruptura gerada para diferentes situações de enchimento/esvaziamento do reservatório.

Os aspectos do entendimento do processo de formação da brecha relacionados ao tempo de esvaziamento do reservatório, vazão efluente e análise do material retido e carregado pela onda de ruptura são informações que estão ligadas com os estudos das zonas de autossalvamento (zona em que se considera não haver tempo suficiente para intervenção das autoridades caso haja uma emergência) e manchas de inundação no vale de jusante das barragens. Desta forma, a compreensão destes fenômenos pode contribuir para tomada de decisões para redução dos danos causados pelo rompimento de barragens, buscando a preservação de vidas.

2. OBJETIVO DE ESTUDO

2.1 Objetivos Gerais

Analisar o efeito de diferentes vazões e tempos de enchimento do reservatório no rompimento estrutural por galgamento em barragens de terra homogêneas através de modelagem física.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Implementar a metodologia experimental em barragens de terra homogêneas.
- b) Caracterizar e analisar a ruptura de barragens por galgamento e a evolução da brecha de ruptura, considerando diferentes tempos de enchimento do reservatório.
- c) Quantificar a onda de ruptura gerada pelo galgamento com diferentes vazões de enchimento.
- d) Verificar a possibilidade de extrapolar os resultados obtidos em laboratório para um protótipo hipotético real.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão tem como foco utilizar a literatura disponível para definir conceitos e apresentar o panorama nacional e mundial sobre barragens. O intuito é definir conceitualmente os diferentes tipos de barramentos, os seus respectivos reservatórios, a importância e os prós e contras destas estruturas, as principais formas de ruptura, apresentar a lei que estabelece a Política Nacional de Segurança de barragens, além de abordar como podemos utilizar os conhecimentos oriundos da modelagem física para minimizar os danos de um possível rompimento de barragem por galgamento.

Ressalta-se que o foco deste trabalho é o rompimento de barragens de água.

3.3 Barragens e suas Classificações

De acordo com INEA (2023), barragens são obstáculos artificiais construídos nos cursos d'água com a finalidade de reter água, qualquer líquido, rejeitos ou detritos. Essas estruturas podem ter tamanhos variados, desde pequenos maciços de terra, usados frequentemente para a agricultura e em fazendas, a enormes estruturas de concreto ou de aterro, utilizadas para fins de acumulação de água para abastecimento público geração de hidroeletricidade, usos relacionados às atividades de mineração e mitigação ou controle de inundações.

As barragens podem ser classificadas quanto ao seu tamanho, ao tipo de material que constitui o maciço, ao método construtivo (que relacionado com o tipo de material utilizado para construção do maciço) e quanto ao uso principal.

Em relação ao tamanho, barragens que possuem mais de 15 metros de barramento (medindo da fundação mais profunda até sua crista) ou barragens entre 5 e 15 metros que armazenam mais de 3 milhões de metros cúbicos de líquidos são consideradas como grandes barragens (ICOLD, 2020). Ao analisarmos dados básicos das barragens submetidas à PNSB, verificamos que mais da metade delas possui altura inferior a 15 metros, sendo que as barragens inferiores a 7,50 metros representam 29% do total (ANA, 2021). Em relação ao volume, 62% das barragens submetidas à PNSB possuem capacidade inferior a 3 hm³ (hectômetros cúbicos), sendo que as com volume inferior a 1 hm³ representam quase a metade do total (48%) (ANA, 2021).

Quanto ao tipo de material as barragens podem ser construídas de terra, terra-enrocamento, concreto convencional, concreto compactado a rolo e alvenaria, por exemplo. É possível constatar em nível nacional, que as barragens submetidas à PNSB até o ano de

2021 eram predominantemente construídas de terra, representando 56% do valor total (ANA, 2022).

Pode-se ainda considerar a classificação que relaciona o tipo de material e o seu método construtivo (ICOLD, 2020). Esses dois fatores se interseccionam devido ao fato de certos tipos de materiais permitirem apenas um determinado método construtivo (ESPARTEL, 2019). Essa classificação é apresentada a seguir com suas respectivas definições, de acordo com Jorge (2013) e Espartel (2019).

- a) Barragem de terra (Figura 2a) ou enrocamento (Figura 2b) – são as mais comuns e possuem uma estrutura mais simples, são constituídas basicamente por solo compactado e enrocamento.
- b) Por gravidade (Figura 2c) – constituídas em concreto ou rochas e antigamente alvenaria. Resistem à força exercida pela água através do seu peso
- c) Por contrafortes (Figura 2d) - consiste na implantação de placas de concreto inclinadas formando um paramento de montante da barragem.
- d) Em arco (Figura 2e) - geralmente são barragens altas e necessita de uma fundação robusta para suportar as solicitações (cargas aplicadas).

Figura 2 – Exemplificação da classificação das barragens que relaciona o tipo de material e método construtivo.



Fonte: Viana, 2023. ANA, 2016. Dam Engineer, 2019 *apud* Espartel, 2019, Sayao, 2009 *apud* Souza, 2013.

Quanto ao uso principal podem ser utilizadas para irrigação, abastecimento humano, geração de energia e contenção de rejeitos, podendo ter usos múltiplos. De acordo com Ana (2022) das barragens submetidas à PNSB, até o ano de 2021, 34% eram destinadas para irrigação, 21% para abastecimento público, 14% hidrelétrica e 8% destinada para contenção de rejeitos de mineração.

3.1 Aspectos Legislativos

Segurança de barragens é uma condição que visa manter a integridade estrutural e operacional da barragem, de modo a minimizar o risco de incidentes ou acidentes, para que essa cumpra sua finalidade e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (ANA, 2021). Para garantir as necessárias condições de segurança ao longo da vida útil das barragens devem ser adotadas medidas de prevenção e controle. Se, devidamente implementadas, essas medidas asseguram uma probabilidade de ocorrência de acidente reduzida. De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens de 2020, 70% das rupturas de barragem ocorrem nos primeiros 10 anos de vida da barragem. As medidas de prevenção e controle devem ser complementadas com medidas de defesa civil, cujo objetivo é reduzir as consequências de uma possível ocorrência de acidente, especialmente em casos em que se associam danos potenciais irreversíveis, como perda de vidas humanas (ANA, 2021). Uma barragem é considerada segura quando é bem cuidada, na qual esforços, energia, recursos e profissionais capacitados são direcionados para uma boa concepção, um bom projeto, uma construção que siga as boas práticas da engenharia (ANA, 2021).

A ANA tem como intuito promover a segurança hídrica no Brasil. Para isso, dentre as várias atribuições e proposições está o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) que é um dos instrumentos previstos na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que foi estabelecido pela Lei nº 12.2334, de 20 de setembro de 2010, alterada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 (conforme 7.3 ANEXO A).

No RSB de 2021 constam 22.654 barragens cadastradas por 33 órgãos fiscalizadores no SNISB. Deste total 50% possuem informações sobre empreendedor, 87% sobre capacidade, 54% sobre altura da soleira da barragem e 51% possuem informações sobre autorização, outorga ou licenciamento. Do total de barragens cadastradas 5.474 estão submetidas à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e 4.313 não estão. As outras 12.867 barragens cadastradas (57%) não possuem informações suficientes para

classificação quanto à submissão à Lei nº 12.334/2010. Há neste relatório 9.451 barragens classificadas, sendo 1.219 classificadas simultaneamente como Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) altos. Das 5.474 barragens submetidas à PNSB, cerca de 28% possuem Plano de Segurança de Barragem (PSB), mas somente 6% foram objeto de inspeção de segurança no ano de 2021. Para as 3.724 barragens com DPA Alto que deveriam possuir o Plano de Ação de Emergência (PAE), em 33% delas, esse documento se encontra concluído. O PAE é um instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens e deve conter a descrição geral da barragem, nomeadamente seu tipo, dimensão, classificação de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado, idade, localização e acessos, além de toda a documentação técnica disponível sobre o projeto, a construção e os requisitos para operação, manutenção, inspeção e monitoramento da estrutura. Verifica-se que 12% das barragens submetidas à PNSB possuem Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB). A maioria dos PSBs e seus componentes elaborados referem-se às barragens destinadas à geração de energia hidrelétrica e contenção de rejeitos de mineração.

Para as barragens de mineração a Agência Nacional de Mineração (ANM) consolida os atos normativos que dispõe sobre segurança de barragens de mineração através da Resolução 95/2022.

3.2 Barragens em Estado de Alerta

Em 2021, foi reportada a existência de 187 barragens de 24 órgãos fiscalizadores que estariam em estado mais crítico. Os principais motivos de alerta destas barragens estão relacionados com a classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) e à Categoria de Risco (CRI) indicados em 49% dos casos (92 barragens), bem como quanto ao estado de conservação, indicado em 48% dos casos (90 barragens). O DPA é o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais. A CRI de uma barragem diz respeito aos aspectos da própria barragem que possam influenciar na probabilidade de um acidente: aspectos de projeto, integridade da estrutura, estado de conservação, operação e manutenção e atendimento ao Plano de Segurança (SNISB, 2023).

É importante salientar que, na grande maioria dos casos, a causa de preocupação dos órgãos fiscalizadores são os fatores anteriormente citados analisados em conjunto, por isso não é possível definir apenas um indicador como parâmetro de priorização das barragens que mais oferecem perigo à sociedade e ao meio ambiente onde estão inseridas (ANA, 2022).

As principais causas de acidentes de barragem, segundo a ANA (2020), ocorrem devido:

- i) insuficiente capacidade de descarga (vertedouro e descarregador de fundo), causando o galgamento da barragem, que se caracteriza pela passagem de água por cima da barragem e como consequência erode o talude e/ou fundação.
- ii) problemas estruturais, que causam erosão interna ou das fundações, formando um escoamento de água descontrolado que arrasta o solo do interior do aterro ou fundação, também conhecido como “piping”.

Os 13 acidentes reportados no RSB de 2021 ocorreram em sua maioria devido aos eventos de cheias e relatam a possibilidade ou a ocorrência de galgamento dessas estruturas, algumas vezes rompendo e esvaziando todo o reservatório. Foi verificado que em todos os acidentes reportados as barragens não possuíam o Plano de Ação de Emergência (PAE), documento essencial nesse tipo de situação (ANA, 2021).

3.2.1 Segurança de Barragens no Rio Grande do Sul

O Estado do Rio Grande do Sul possui 9.918 reservatórios cadastrados no SNISB e é o Ente da Federação com maior número de cadastros de acordo com consulta realizada em 14/02/2023 pelo Grupo de Trabalho (GT) de Segurança de Barragens pertencente ao Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento (DRHS) da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA-RS). Neste sentido, no período entre 01/01/2022 até 12/12/2022 foi elaborado o Relatório de Atividades 2022 que traz informações sobre as barragens e açudes de acumulação de água para usos múltiplos (irrigação, abastecimento público, uso industrial, entre outros), excluindo as barragens com finalidade de geração hidrelétrica, barragens de mineração e barragens de disposição de resíduos industriais (pois não estão sob a alçada fiscalizatória do DRHS).

Para contextualização, no Rio Grande do Sul, a emissão dos atos autorizativos relacionados ao uso de recursos hídricos é executada pela Divisão de Outorga (DIOUT) do DRHS. Assim, a análise de processos relacionados à regularização da outorga de direito de uso da água, à obtenção do alvará de obra de barragens e açudes, e à aplicação da política de segurança de barragens são realizadas via Sistema de Outorga do Rio Grande do Sul – (SIOUT RS). Deste modo, os critérios gerais para classificação de barragens e açudes por categoria de risco (CRI), dano potencial associado (DPA) e pelo volume do reservatório são partes obrigatórias do processo para regularização a serem efetivadas via SIOUT RS.

Entre 1º de janeiro e 12 de dezembro de 2022 foram emitidas 298 Portarias de Outorga ou Dispensa de Outorga de reservatórios de acumulação de água via plataforma SIOUT. Deste total, 88% foram reservatórios (açudes e barragens) com até 15.000 m³ de volume normal armazenado. Apenas seis reservatórios tinham mais de 3 milhões de m³ e, portanto, estão automaticamente enquadrados na PNSB. Em relação à altura 183 (62%) possuíam altura máxima de taipa entre 1,5 e 5 m, e seis estavam enquadrados na PNSB pelo critério da altura do barramento. Quanto ao material de construção dos barramentos 45% foram construídas com terra homogênea. O uso preponderante (82%) dos reservatórios regularizados no ano de 2022 está associado a atividades agropecuárias (irrigação, piscicultura e dessedentação animal).

A análise dos dados mostra que a maior parte dos reservatórios (91%) regularizados neste período foram classificados com DPA Baixo, a partir das informações prestadas pelos responsáveis técnicos durante a instrução dos processos no SIOUT RS. Dos 298 reservatórios regularizados em 2022, 14 apresentam DPA Alto e 11 foram classificados com DPA Médio, portanto, deverão elaborar e implementar o Plano de Segurança de Barragem. Em 85% dos reservatórios regularizados, a classificação de CRI foi Baixa.

Considerando as informações documentais e as vistorias *in loco* de barragens sob responsabilidade fiscalizatória do DRHS, o GT Segurança de Barragens elabora, todo os anos, uma lista das barragens que mais preocupam (Quadro 1).

Ressalta-se que para elaboração deste item 3.2.1 Segurança de Barragens no Rio Grande do Sul foi utilizado como referência o Relatório de Atividades 2022 elaborado pelo Grupo de Trabalho de Segurança de Barragens (SEMA, 2022).

Quadro 1 - Lista com as barragens que mais preocupam o GT Segurança de Barragens da SEMA-RS.

Código SNISB	Empreendedor	Localização	Motivo da preocupação
23889	Departamento Municipal de Água e Esgotos	Porto Alegre /RS	Em desuso, sem manutenção e com diversas anomalias que comprometem a estabilidade e segurança do maciço. Área a jusante intensamente povoada.
17114	Associação dos Moradores do Assentamento Filhos de Sepé/Distrito de Irrigação Águas Claras e Instituto de Colonização e Reforma Agrária - Superintendência Regional do RS	Viamão /RS	Não possui documentação relacionada à outorga e PNSB; diversas anomalias, como percolação excessiva no maciço, insuficiência de vertedor, depressão na ombreira esquerda, sem canal de fuga ou restituição; presença de vegetação. Está localizada na Área de Proteção Ambiental do Banhado Grande
5324	Elias Scholsser Doviggi	Barra do Quarai/RS	Apresenta diversas anomalias que comprometem a estabilidade e segurança do maciço e que podem causar danos no seu entorno, em caso de rompimento, vazamento ou mau funcionamento da barragem, inclusive impactando diretamente o Parque Estadual do Espinilho.
5420	Cooperativa Agrícola Mista São Marcos LTDA.	Uruguaiana /RS	O maciço da barragem está construído sob uma rodovia federal, estar próxima da fronteira com outro país, pela presença excessiva de árvores de médio e grande porte ao longo de todo talude de jusante e não possuir documentação atualizada quanto à outorga e PNSB.
6421	Instituto Rio Grandense do Arroz - IRGA	Cachoeira do Sul /RS	Barragem não possui estrutura extravasora (vertedouro) compatível com o potencial de armazenamento. Cabe informar que o Instituto Rio Grandense do Arroz realizou obras de adequação estrutural para melhoria da segurança e estabilidade da barragem, e está em processo de implantação do Plano de Ação de Emergência (PAE).

Código SNISB	Empreendedor	Localização	Motivo da preocupação
23891	Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica – CEE-GT	Canela /RS	Barragem em desuso, sem manutenção adequada. Existem danos na estrutura de concreto à jusante da barragem na região da ombreira direita, identificados após movimento de massa da encosta da área da barragem (não foi possível identificar se houve comprometimento da estrutura). Também problemas relacionados ao acionamento das estruturas de tomada da água
6514	AUD - Associação dos Usuários do Perímetro de Irrigação do Arroio Duro	Camaquã /RS	Não possui PSB (e PAE) consolidado, considerando grande presença de população potencialmente afetada no vale a jusante. Importante informar que o empreendedor vem desenvolvendo vistorias anuais e manutenções, de maneira que não existem anomalias que demandem urgência na solução, conforme informado pelos responsáveis pela barragem.
27934	Não Identificado	Pontão /RS	Barragem não tem empreendedor identificado, sem informações técnicas, sem manutenção, presença de árvores ao longo de todo maciço e outras anomalias que comprometem a estabilidade e segurança do maciço.
27935	Não Identificado	Sarandi /RS	Barragem não tem empreendedor identificado, sem informações técnicas, sem manutenção, presença de árvores ao longo de todo maciço e outras anomalias que comprometem a estabilidade e segurança do maciço.
27987	Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do Estado do RS	Viamão /RS	Não possui documentação técnica de regularização (sem outorga e sem Plano de Segurança da Barragem) e apresentar uma série de anomalias de grande magnitude que indicam maior probabilidade de falha da barragem e que ameaçam a segurança do vale à jusante.

Observação: considera-se todas as barragens sob responsabilidade do Instituto de Colonização e Reforma Agrária - Superintendência Regional do RS (INCRA) como intervenções preocupantes e todas as barragens localizadas no Estado do RS que foram construídas com recursos da União estão incluídas na lista de barragens que preocupam também.

Fonte: SEMA, 2022.

3.4 Barragens de Terra

Pelo fato de as barragens de terra caracterizarem a maioria dos acidentes que ocorreram nos anos de 2020 e 2021, de acordo com os Relatórios de Segurança de Barragens, este trabalho irá focar em compreender estas estruturas e suas principais causas de ruptura.

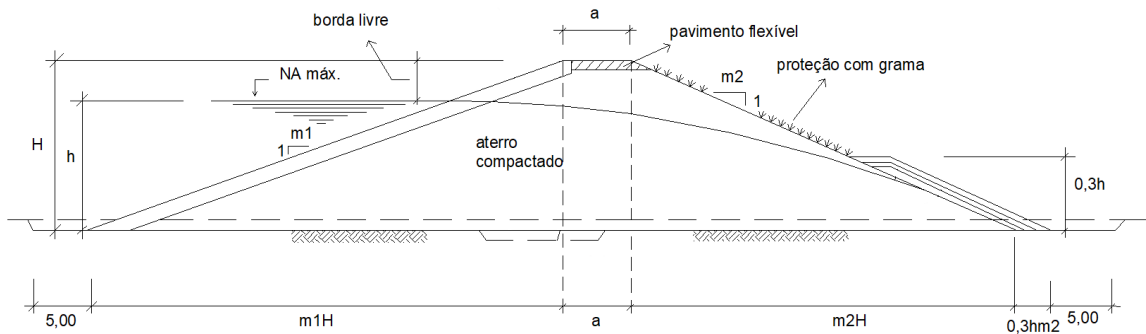
As barragens de terras têm sido usadas, desde os tempos mais remotos, para aprisionar e desviar água. São simplesmente estruturas compactadas que dependem da sua massa para resistir ao deslizamento e tombamento. É o tipo de barragem mais comum encontrado em todo o mundo (STEPHENS, 2011). Para a sua construção, são adotados materiais naturais (argila, areia e silte) com um mínimo de processamento prévio.

Em relação aos materiais, solos argilosos altamente impermeáveis são ideias para utilização no núcleo da barragem, devido à alta impermeabilidade, devendo ser bem compactado. O maciço de montante não requer a utilização de um solo argiloso altamente impermeáveis dado que isto poderia levar ao aparecimento de pressões ascendentes debaixo desta secção do aterro. A utilização de material predominantemente siltoso requer atenção, pois esse solo apresenta pouca coesão, dificuldade de compactação e inerente instabilidade quando molhado. Um solo com predominância de areia não deverá ser usado na construção de barragens. A combinação de argila e areia são as mais adequadas para a construção de barragens. Solos argilo-arenosos são muito adequados para inclusão na secção de montante dado que compactam bem, possuem reduzida capacidade de percolação, mas não permitem o acumular de altas pressões solo-água (STEPHENS, 2011).

Ainda, segundo Stephens (2011), a impermeabilidade do solo usado variará entre locais, mas alguma padronização na estanqueidade pode ser conseguida variando o grau de compactação envolvida. Um material mais permeável necessitará de maior compactação e vice-versa.

A construção de barragens de terra é apropriada para locais onde a topografia se apresente suavemente ondulada, nos vales pouco encaixados, e onde tenham áreas de empréstimo de materiais argilosos/arenosos suficientes para a construção do maciço compactado (ELETROBRÁS, 2000). Detalhes típicos da seção e da construção de barragem de terra são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Representação de uma barragem hipotética homogênea de terra ($H < 10$ m).



Fonte: Eletrobrás, 2000.

De acordo com Stephens (2011) as principais vantagens envolvidas na construção de pequenas barragens de terra são:

- São utilizados materiais naturais locais.
- Os procedimentos do projeto são simples.
- Os requisitos para as fundações são menos exigentes do que para outro tipo de barragens. A base larga de uma barragem de terra distribui a carga nas fundações.

Barragens de terra resistem ao assentamento e movimentos do solo melhor do que estruturas mais rígidas e podem ser mais adequadas para áreas onde esses movimentos são comuns. Em contrapartida, as desvantagens citadas por Stephens (2011) na utilização dessas estruturas são:

- Uma barragem de terra é mais fácil de ser danificada ou destruída pela água corrente, passando sobre ou batendo contra ela. Assim, um descarregador/vertedor e proteção adequada a montante são essenciais para qualquer barragem.
- Projetar e construir descarregadores/vertedores adequados é normalmente a parte tecnicamente mais difícil de qualquer trabalho de construção de uma barragem.
- Durante a construção, se não for adequadamente compactada, a barragem apresentará uma integridade estrutural fraca, apresentando pontos preferenciais de infiltração.
- As barragens de terra requerem manutenção contínua de forma a evitar erosão, crescimento de árvores, sedimentação, infiltração e danos provocados por insetos e animais.

3.4.1 Barragens de Terra Homogênea ou Zonada.

As barragens de terra podem ser classificadas como de terra homogênea ou zonadas e cada uma delas é exemplificada a seguir.

- Barragens de Terra Homogênea

Marangon (2004, p. 5) apud Birck (2016) descreve a barragem de terra homogênea da seguinte forma:

Barragens de terra homogênea são aquelas cuja construção foi feita através da utilização de apenas um tipo de material de empréstimo. Por conta disso, há a necessidade de que os taludes possuam inclinações suaves, permitindo um maior controle sobre a estabilidade da barragem, assim como da busca por materiais mais impermeáveis, a fim de dificultar a percolação da água.

Segundo Massad (2010, p. 177) apud Birck (2016), dentre todos os métodos, as barragens de terra homogênea, apresentam-se como um dos mais utilizados pela relativa simplicidade de elaboração de projeto e construção. Além disso, tais barragens têm como vantagem um custo final relativamente baixo, visto que não demandam tanta mão de obra e equipamentos quando comparadas a outros modelos, aliado a uma grande variedade e disponibilidade de material de empréstimo no Brasil. No entanto acabam por serem construídas muitas vezes baseando-se apenas em conhecimento empírico, sem considerar corretamente alguns fatores no seu dimensionamento, tais como: granulometria do material; capacidade de percolação através da estrutura; e inclinação dos taludes (BIRCK, 2016).

De acordo com Stephens (2011) em barragens de terra homogênea a pressão nos poros no interior do aterro e a ocorrência de percolação poderão ser um problema, principalmente para: reservatórios com um nível alto ou com rápidas flutuações de nível de água por longos períodos; e para uma barragem com fundações impermeáveis. Se a percolação for excessiva, isto poderá levar a instabilidade e eventualmente a falha de toda ou parte da face a jusante (STEPHENS 2011).

- Barragens de Terra Zonadas




Nas barragens zonadas há um núcleo de material impermeável e duas zonas externas, em geral construídas com materiais mais permeáveis e mais resistentes aos deslizamentos. São uma melhor alternativa para barragens maiores, pois permitem facilmente a utilização de maquinário para sua construção (Stephens, 2010). Ainda, segundo Stephens (2010):


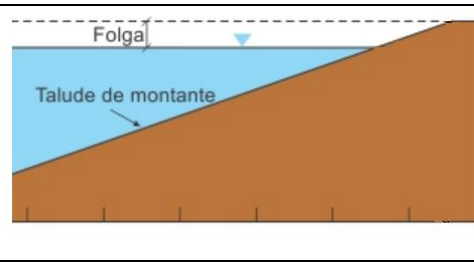
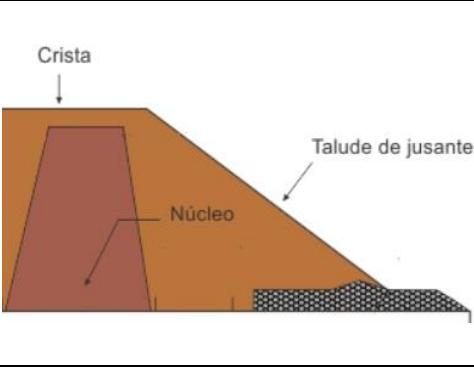
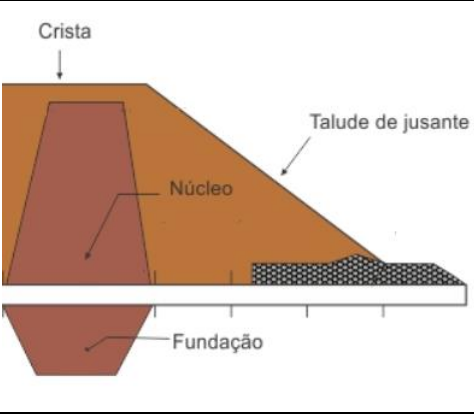
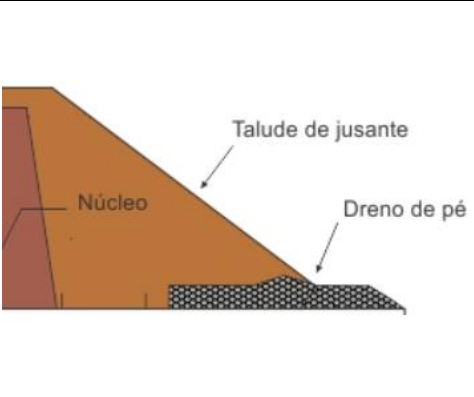
Com este tipo de barragem, possíveis perigos de infiltração são reduzidos ao mínimo. Comparadas com barragens de aterro homogêneo, os custos são susceptíveis de ser mais altos, principalmente porque o material de terraplanagem é dividido em três categorias: permeável para a face jusante, impermeável para o núcleo e semi-impermeável para a secção a montante, sendo todas elas escavadas de áreas de empréstimo diferentes (de preferência dentro da área do reservatório), logo aumentando os custos de escavação e transporte.


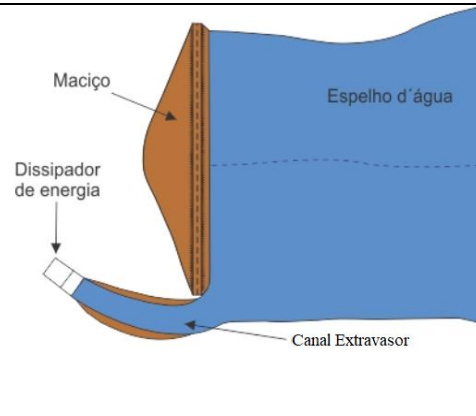

3.4.2 Principais Elementos de uma Barragem de Terra

Os principais elementos que caracterizam e constituem uma pequena barragem de terra podem ser visualizados no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais elementos de uma pequena barragem de terra.

<p>Maciço</p>	
<p>É a própria estrutura da barragem que é construído transversalmente ao curso d'água e é responsável por reter a água. Na figura ao lado é possível observar a construção do maciço de uma barragem de terra.</p>	
<p>Talude</p>	
<p>São as faces laterais e inclinadas, paralelas ao eixo do maciço sendo, talude de montante o lado que fica em contato com a água do reservatório e o de jusante sem contato com a água. O talude de montante deve ser mais inclinado que o de jusante, para permitir a maior estabilidade do aterro, devido ao decréscimo da componente horizontal da força, que tende empurrar o maciço da barragem.</p>	
<p>Altura da Barragem</p> <p>A altura de uma barragem é a distância vertical entre a superfície do terreno que recebe a barragem e a superfície da água no reservatório, por ocasião da ocorrência da vazão máxima de projeto do extravasor, acrescida de uma borda livre ou folga.</p>	
<p>Crista do Maciço</p>	
<p>Parte superior horizontal da barragem. Permite o trânsito de pedestres e automóveis.</p>	

Reservatório	
Área destinada para o acúmulo de água.	
Distância vertical entre o nível da água, quando a represa estiver cheia, e a crista do maciço ou do aterro. Na figura ao lado a borda livre está indicada como folga.	
Quando o material disponível para construção do maciço é homogêneo com predominância de argila, ou ainda, havendo uma camada arenosa permeável no leito do local, é imprescindível a construção de um núcleo central com predominância de argila que intercepte a trajetória da água.	
Estrutura de base da barragem que tem como função ancorar o maciço impedindo que ele se mova ou sofra deformações.	
Para a linha de saturação manter-se abaixo do pé de uma barragem de terra, isto é, dentro de seu corpo, ou para reduzir a subpressão hidráulica, pode-se recorrer ao uso de drenos. Os drenos devem ser construídos de modo que as águas de infiltração possam sair sem causar erosão no aterro, funcionando como filtros inversos.	

<p style="text-align: center;">Desarenador</p>	
<p>Tem como objetivo principal a eliminação dos depósitos do fundo e ao esvaziamento do reservatório. A foto ao lado representa a construção de um desarenador.</p>	
<p style="text-align: center;">Sistema Extravasor</p>	
<p>São sistemas de maior importância para a segurança de barragens, constituídos por vertedouros e descarregadores de fundo, possuindo as funções de regularização dos níveis do reservatório. Em barragens de terra o tipo de sistema extravasor mais recomendado é um canal lateral construído fora do aterro (canal extravasor).</p>	<p style="text-align: center;">Tomada D'água</p> <p>São as estruturas através das quais, normalmente, se faz a liberação da água do reservatório. Tomadas d'água podem também ser usadas para rebaixar ou esvaziar o reservatório. A figura apresenta a vista da tomada de água (canto inferior direito).</p>

Fonte: Adaptado de Euclides, 2005 e utilizado algumas definições do documento da ANA intitulado como Definições Importantes sobre Segurança de Barragens.

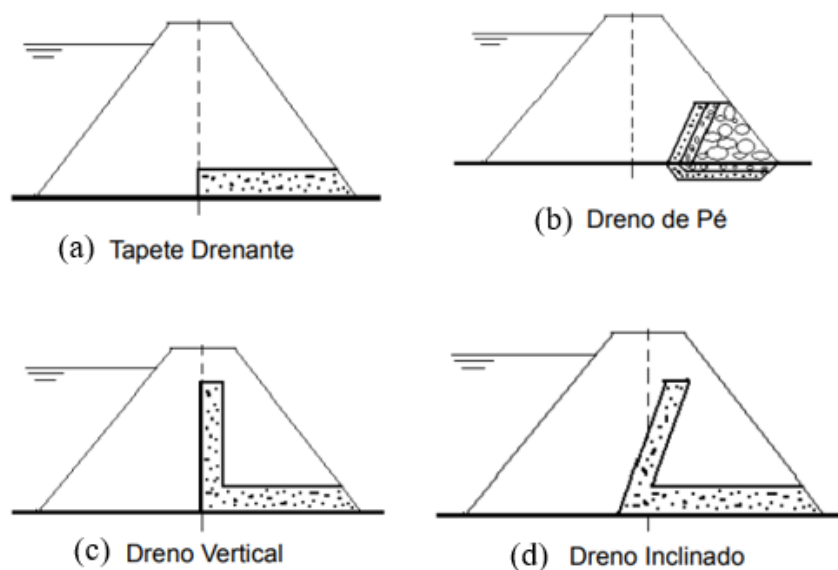
3.4.3 Percolação em Barragens de Terra

Segundo Meirelles (2014) a infiltração ou percolação é o movimento contínuo da água a partir do talude de montante da barragem em direção ao talude de jusante. Esse movimento é afetado pelo grau de compacidade do solo, da textura, do grau de saturação, da estrutura e da temperatura da água, que influencia a sua viscosidade. Essa infiltração deve ser limitada de acordo com o princípio do controle de fluxo, para evitar que esse fluxo aflore no talude de jusante e provoque o arraste das partículas mais finas. Se essa infiltração não for limitada pode ocorrer processos erosivos internos na barragem. Em razão disto é necessário prever, na fase de projeto, o comportamento da infiltração no maciço e sob o mesmo.

Para redirecionar o fluxo, evitar a erosão interna e reduzir as pressões intersticiais na porção de jusante (o que aumenta a estabilidade da obra) é realizada a inserção de elementos de drenagem, conforme Figura 4. A presença destas estruturas é recomendável para barragens acima de seis metros.

Os tapetes drenantes (Figura 4a) são adequados para fundações de comportamento uniforme e não são suficientes para drenar maciços estratificados. Os drenos de pé de jusante asseguram a continuidade ao tapete drenante e constituem uma segurança adicional (Figura 4b). O dreno vertical (Figura 4c) intercepta os fluxos em fissuras no maciço e devem ter espessuras de até 2,0 m. O dreno inclinado (Figura 4d) elimina riscos de trincas longitudinais na crista das barragens de aterro construídas sobre fundações rígidas (ELETROBRAS, 2003 E MEIRELLES, 2014).

Figura 4 – Sistemas de drenos comuns utilizados para barragens de terra.



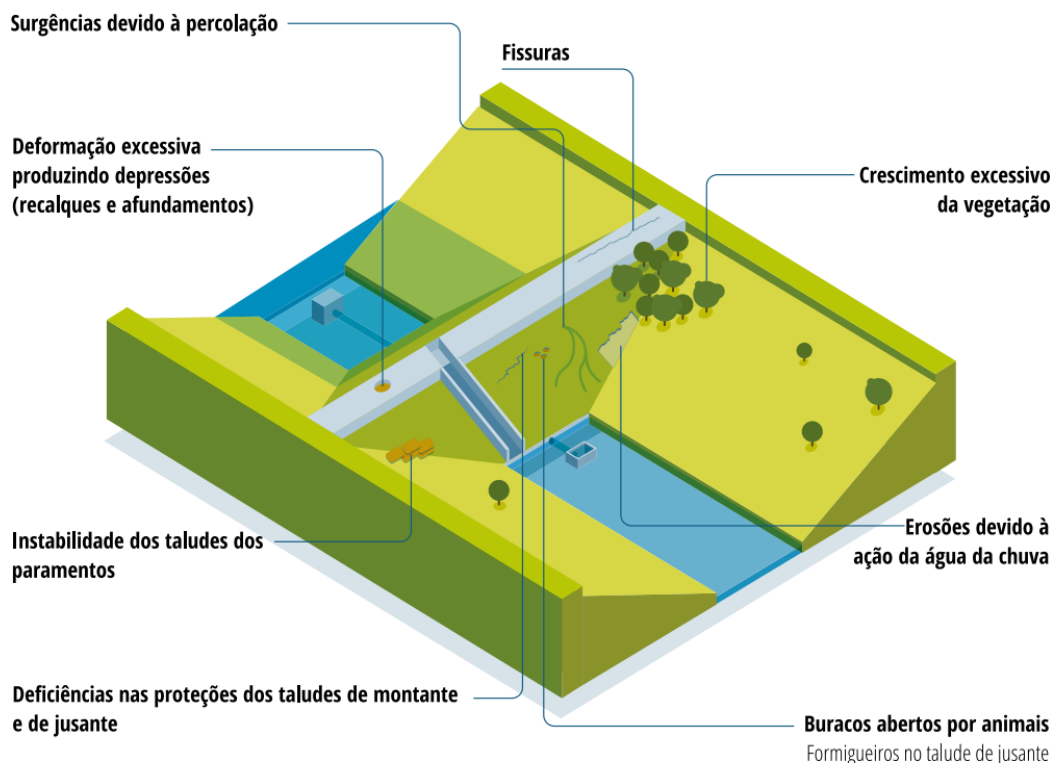
Fonte: Meirelles, 2014.

A eficiência do dreno depende da sua localização e extensão. Para barragens de terra de seções homogêneas, o sistema de drenagem interna será constituído, por filtros (ou drenos) verticais ou inclinados e sub-horizontais conjugados, além de drenos de pé. Para alturas superiores a 15 m, os sistemas de drenagem deverão ser dimensionados com mais de um elemento drenante (MEIRELLES 2014).

3.4.4 Anomalias em Barragens de Terra

As principais anomalias verificadas em barragens de terra podem ser visualizadas na Figura 5. Define-se anomalia como qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa afetar a segurança da barragem (ANA, 2022).


Figura 5 – Anomalias verificadas em barragens de aterro.









Fonte: RSB, 2020.

No Quadro 3 são descritos e visualizados alguns exemplos destas anomalias.

Quadro 3 - Definição e exemplificação das principais anomalias que ocorrem em barragens de terra.

Fissura	
<p>Separação do material que era contínuo. A presença de fissuras pode prejudicar a estabilidade do maciço por alterar a capacidade de resistência do material e possibilitar a entrada de água aumentando efeitos de percolação.</p>	

<p>Crescimento Excessivo de Vegetação</p>	
<p>O desenvolvimento de plantas com raízes profundas, é indesejável, pois pode implicar em danos às estruturas devido ao crescimento das raízes, que encurtam o caminho para a percolação e podem criar vazios no maciço pela decomposição das raízes ou da remoção de árvores.</p>	
<p>Erosões</p>	
<p>Podem causar brechas nos taludes e na crista da barragem, prejudicando a segurança da barragem devido a infiltração de água na estrutura.</p>	
<p>Buracos</p>	
<p>São perigosos para a segurança estrutural da barragem porque enfraquecem o maciço e podem criar caminhos preferenciais para a percolação. Como exemplo é apresentado a toca de um tatu.</p>	
<p>Deficiência na Proteção dos Taludes</p>	
<p>As proteções dos taludes existem para prevenir que ocorra erosão provocada pela chuva, ressecamento de solo, vento e outras situações. A foto ao lado é um exemplo de um talude com vários pontos sem proteção de grama.</p>	
<p>Buracos e/ou Afundamentos</p>	
<p>Buracos em barragem podem demonstrar problemas mais profundos e a presença de afundamentos no corpo do barramento pode indicar falhas na compactação. Exemplo de bambu em ambos os lados da barragem que prejudicam estruturalmente o talude e não permitem que o sol atinja o solo, o que acaba por resultar em poças de água.</p>	

Surgências devido a Percolação	
Percolação de água no maciço que pode provocar o desmoronamento das margens do reservatório. Na figura é possível observar a presença de água no pé da barragem.	

Fonte: Adaptado do Guia Prático de Manutenção de Barragens de Terra, elaborado pelo IMASUL – Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul.

3.4.5 Rompimento de Barragens de Terra

A partir da análise bibliográfica das rupturas históricas de barragens Jorge (2013) constatou que o tipo de ruptura está fortemente correlacionado com o tipo de barragem. Barragens de terra, rompem essencialmente devido a mecanismos de ruptura hidráulicos e de percolação, por exemplo, galgamento, surgência, erosão interna entre outros.

Nas barragens de terra que rompem por galgamento (Figura 6), o escoamento sobre a estrutura causa o corte em profundidade do coroamento e a erosão do material do talude de jusante. Estes processos levam à formação de uma zona frágil, pela qual a barragem pode colapsar localmente, podendo o processo de corte (brecha) em profundidade evoluir até atingir a base do aterro. A localização da zona frágil geralmente se concentra na zona central da barragem (onde as maiores alturas de água são observadas durante o galgamento, explicando assim o motivo da ruptura ocorrer nesta região) e/ou na região de cota mais baixa da crista. Salienta-se que uma compactação não uniforme no aterro pode originar um ponto frágil que constituirá preferencialmente o desenvolvimento da brecha (JORGE, 2013).

Figura 6 - Barragem de aterro galgada, situada no rio Missouri, EUA.

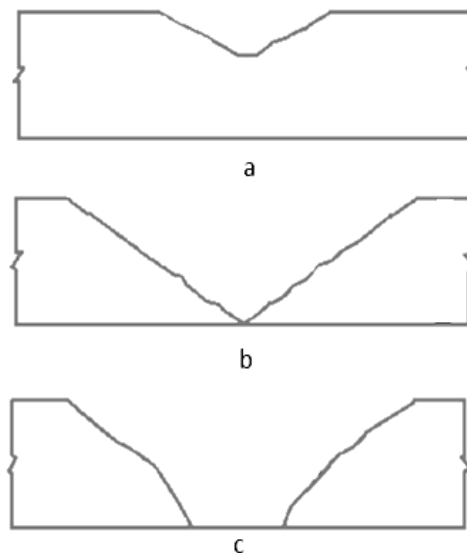


Fonte: Farmland 2011, apud Jorge, 2013.

Na ruptura, a brecha que se forma na barragem de aterro terá preferencialmente, e no início, uma forma triangular (Figura 7a). Uma vez erodido o material menos resistente da barragem, e mantendo os níveis elevados da cheia, as geometrias ilustradas na Figura 7b e Figura 7c podem ser atingidas, com a erosão se desenvolvendo lateralmente e dando origem a geometrias finais de forma trapezoidal. A extensão desta erosão lateral depende da dimensão do reservatório e do volume de água armazenada.

Este fenômeno está normalmente associado a um evento hidrológico extremo, onde o volume do reservatório e as estruturas de descarga da barragem não são suficientes para armazenar e extravasar a quantidade de água (FARIA et al., 2019).

Figura 7 - Evolução de uma brecha provocada por galgamento.
a) Brecha inicial. b) Brecha intermediária. c) Ruptura total.



Fonte: Johnson e P. 1976.

As barragens de terra não são destinadas a impedir totalmente a passagem de água por suas fundações ou aterros, sendo a percolação de certa quantidade de água inevitável. A ruptura devido a erosão interna (“*piping*”) é provocada pela remoção de partículas do interior do solo (partículas de pequena dimensão), resultando em um subleito mais poroso e conseqüentemente mais instável. O colapso da estrutura ocorre porque o núcleo vai sendo removido (Figura 8). Uma das principais causas do “*piping*” em barragens é a inadequada compactação das camadas do maciço associada a inadequação do material utilizado (JORGE, 2013).

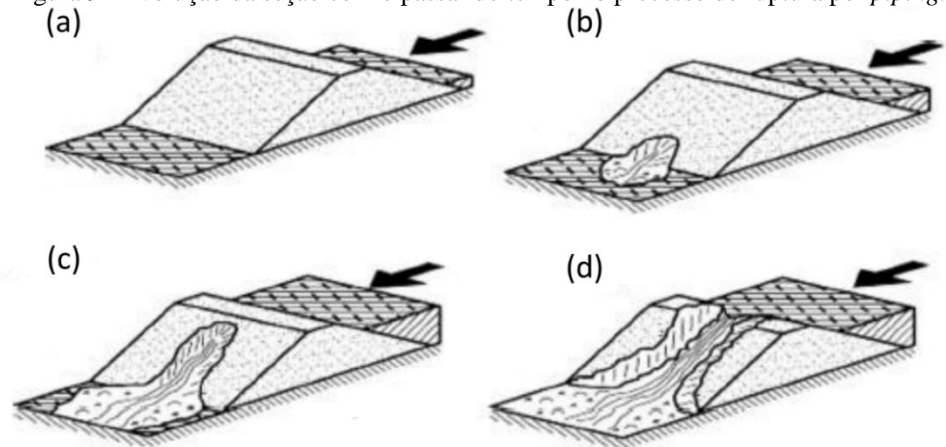
Figura 8 - Rompimento de barragem por piping.



Fonte: Vargas & outros, 1955 apud Mello, 2021.

O processo de *piping* se inicia no talude de jusante (Figura 9b), no ponto de saída do fluxo percolado, e progride para montante, formando um tubo causando o alargamento da seção da barragem deste caminho dando início a brecha (Figura 9c). No caso de ruptura por *piping*, o tubo inicial é especificado como um conduto retangular ou trapezoidal em uma elevação de partida e a altura e largura do conduto aumentam até a brecha se transformar em um canal aberto (Figura 9d). Posteriormente, a largura do fundo e a elevação do fundo continuam a mudar devido ao rigoroso processo de erosão até que a configuração da brecha final seja obtida (PAGOTTO, 2017).

Figura 9 - Evolução da seção com o passar do tempo no processo de ruptura por *piping*.



Fonte: Gregoretti, Maltauro e Lanzoni, 2010.

3.4.6 Acidentes em Barragens de Terra

Neste capítulo são apresentados dois exemplos de acidentes que ocorreram com barragens de terra no Brasil, no ano de 2019 e 2021 segundo o RSB de 2019 e 2020, devido a ruptura por galgamento. No segundo exemplo, Barragem do Quatis dos Fernandes e Barragem do Iguá, o rompimento ocorreu em efeito cascata.

- Barragem Quati

A barragem Quati, localizada no município de Pedro Alexandre/BA, rompeu na data de 11/07/2019. A barragem de terra, possuía 7,65 m de altura e um volume de 0,597 hm³. O motivo do acidente se deu devido ao galgamento e subsequente erosão do aterro da barragem (ANA, 2020). No período compreendido entre 7 e 11 de julho de 2019, a ocorrência de fortes chuvas, com precipitação pluviométrica acima de 180 mm na região de Pedro Alexandre provocou o aumento demasiado do nível do reservatório da Barragem do Quati e a estrutura do barramento se rompeu por não conseguir suportar o volume de água (CNDH, 2019). A barragem Quati transbordou por volta das 6 h de uma quinta-feira, e a estrutura se rompeu às 11 h deste mesmo dia (Figura 10). Em menos de 24 horas (entre 10/07 e 11/07), o volume de chuva no município foi de 100 milímetros (ABGR, 2019).

Figura 10 - Imagens após o rompimento da Barragem de Quati.



Fonte: G1, 2019.

Como consequência a Defesa Civil do estado da Bahia apontou que famílias ficaram ilhadas, desalojadas e desabrigadas. Estradas inacessíveis, canais entupidos, houve comprometimento de pontes de pequeno porte e desabamento de casas. A cidade vizinha Coronel João Sá, que fica a 45 km de Pedro Alexandre, foi a mais atingida pela ruptura da barragem, porque fica em um nível mais baixo que Pedro Alexandre. O rio do Peixe, que corta a região, tem um percurso de 80 km entre as duas cidades e as pessoas que viviam na margem do rio tiveram que ser evacuadas por segurança. Os danos e áreas afetadas alcançaram proporções maiores em Coronel João Sá (Figura 11), resultando em desabrigados desalojados, comprometimento em unidades habitacionais, em instalações públicas de uso comunitário, em instalações de ensino e de prestações de serviços básicos. Estradas foram danificadas e houve contaminação da água e do solo em razão do extravasamento de redes de esgoto e fossas sépticas (CNDH, 2019).

Figura 11 - Imagem de Coronel João de Sá após a ruptura da Barragem do Quati em Pedro Alexandre.



Fonte: G1, 2019.

De acordo com o CNDH (2019) foi apresentado o seguinte cenário do evento em Coronel João de Sá:

Desabrigados: pessoas que necessitam de abrigo público, como habitação temporária, em função de danos ou ameaça de danos causados em decorrência direta dos efeitos do desastre. Total: 128.

Desalojados: pessoas que, em decorrência dos efeitos diretos do desastre, desocuparam seus domicílios, mas não necessitam de abrigo público. Total: 760.

Outros afetados: Pessoas afetadas diretamente pelo desastre. Total: 13.596.

Total de Afetados: 14.484.

- Barragem Quatis dos Fernandes e do Iguá

O acidente ocorreu no dia 25/12/2021 e foi uma ruptura em efeito cascata. A primeira barragem a romper foi a barragem Quatis dos Fernandes. A barragem era de terra e não apresentava informações de altura, volume e seu empreendedor de acordo com o relatório da ANA (2022). O motivo da ruptura foi o galgamento do maciço em virtude das fortes chuvas registradas na região e a estrutura colapsou.

A onda de ruptura da barragem Quatis dos Fernandes provocou o galgamento e rompimento de uma barragem localizada a jusante, a barragem do Iguá, localizada no município de Vitória da Conquista na Bahia, também no dia 25/12/2021. A barragem era de terra e no relatório da ANA de 2022 não constavam informações referente à altura, volume e empreendedor. A Barragem do Iguá sofreu galgamento em virtude das fortes chuvas registradas na região e houve colapso da estrutura de contenção. Não houve vítimas fatais em ambos os acidentes.

O rompimento em cascata se caracteriza pelo colapso de uma barragem que causa danos a barragens situadas a jusante. Neste caso a Barragem do Quatis dos Fernandes rompeu a montante e a onda de propagação atingiu a Barragem do Iguá situada a jusante. O efeito em cascata pode ser desencadeado por episódios de elevada pluviosidade concentrada em determina área em um curto espaço de tempo. Frequentemente, nestes acidentes, ocorrem galgamentos das barragens que trazem transtornos à população ribeirinha.

3.5 Modelagem Física com Barragens de Terra

Modelos físicos ou modelos reduzidos em escala são ferramentas utilizadas para estudos da integração do escoamento com estruturas hidráulicas complexas e sua construção permite que sejam observadas, analisadas e medidas as propriedades físicas que antecedem qualquer fenômeno (Trautwein et al., 2022). Sendo que neste trabalho, estas propriedades físicas, estão relacionadas com a ruptura do barramento de terra homogênea por galgamento e a análise hidráulica do escoamento gerado.

Assim, é de suma importância compreender como são realizadas a construção destes modelos físicos. A partir do levantamento bibliográfico, quatro trabalhos (Quadro 4) cujo foco foi a realização de modelagem física em barragens de terra, servirão de suporte para a implementação da metodologia a ser implantada. Nesses trabalhos buscou-se entender como foram realizados os experimentos e como foram determinadas as características gerais das barragens, tais como: altura; altura da lâmina de água no momento da ruptura; volume do

reservatório, comprimento e largura da crista; inclinação dos taludes de montante e jusante etc.

Quadro 4- Levantamento bibliográfico de trabalhos realizados de modelagem física em barragens de terra.

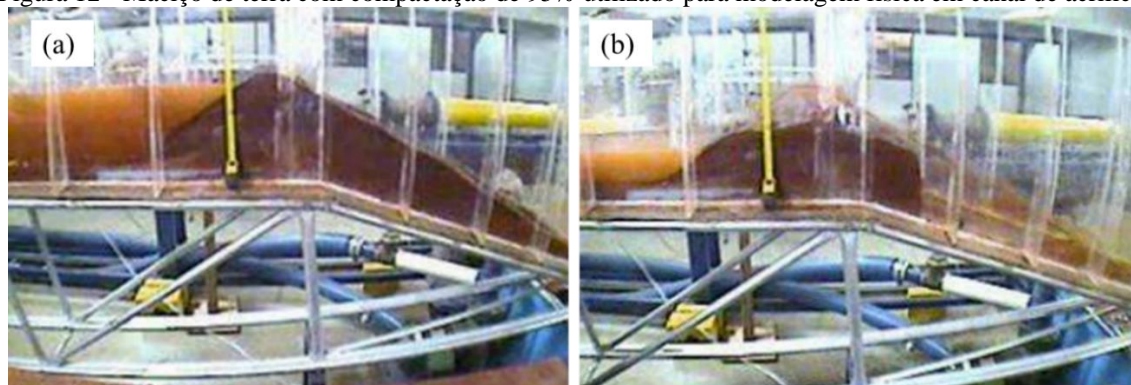
Autor	Ano	Local	Título
Aloysio Saliba	2009	Belo Horizonte	Uma Nova Abordagem Para Análise De Ruptura Por Galgamento De Barragens Homogêneas De Solo Compactado
Ricardo Jorge	2013	Lisboa	Rotura de Barragens de Aterro por Galgamento Ensaio Experimentais com Aterros Homogêneos
Thays Oliveira et al.	2018	Foz do Iguaçu	Avaliação de Modelos Físicos Reduzidos Construídos em Laboratório para o Estudo da Percolação de Água em duas Barragens Homogêneas de Terra
Daniel Trautwein et al.	2022	Belo Horizonte	Simulação e Estudo das Deformações que Precedem o Rompimento de Barragens Através de Modelos Reduzidos

Fonte: Elaborado pelo autor.

No trabalho de Saliba (2009) foi aplicada uma metodologia destinada a dar suporte à análise da ruptura de barragens, enfocando o fenômeno de erosão. Foram construídas bancadas de laboratório que permitiram a visualização do fenômeno e da formação de fossas de erosão ao longo do paramento de jusante das barragens de pequena dimensão ensaiadas. O material utilizado para construção do maciço foi classificado como argila areno-siltosa segundo a ABNT, com a fração argilosa superior a 40%. Foram realizados ensaios com maciços com graus de compactação de 95% e 100%. A compactação das camadas foi realizada com aplicação de golpes utilizando o soquete Proctor Normal.

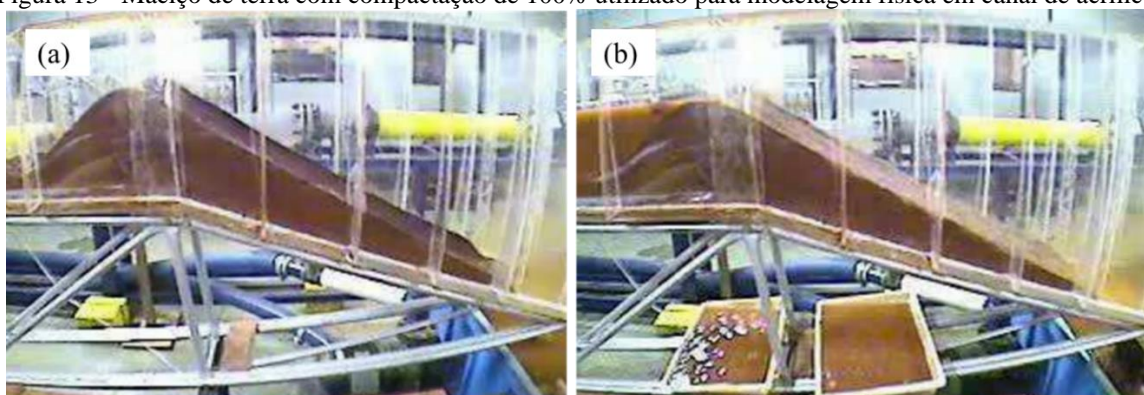
Na Figura 12 é apresentada uma exemplificação do início (Figura 12a) e do final (Figura 12b) do ensaio realizado no maciço com grau de compactação de 95% e na Figura 13 o início (Figura 13a) e o final (Figura 13b) do ensaio realizado no maciço com grau de compactação de 100%.

Figura 12 - Maciço de terra com compactação de 95% utilizado para modelagem física em canal de acrílico.



Fonte: Saliba, 2019.

Figura 13 - Maciço de terra com compactação de 100% utilizado para modelagem física em canal de acrílico.



Fonte: Saliba, 2019.

Foi possível concluir neste trabalho que o processo de ruptura de uma barragem é fortemente dependente do grau de compactação do solo utilizado na composição do maciço e a erosão devido ao escoamento não é o único processo interveniente na erosão do maciço. Ainda, é possível estimar, mediante a realização de ensaios em laboratório, qual o tempo de ruptura de uma barragem submetida a uma hidrografia de entrada. Para finalizar, a variação do grau de compactação tem uma influência significativa sobre a taxa de erosão do maciço, sendo possível estimar qual o custo incremental para se ampliar o tempo de ruptura de uma barragem, ou até mesmo para impedir que esta venha a sofrer um colapso total.

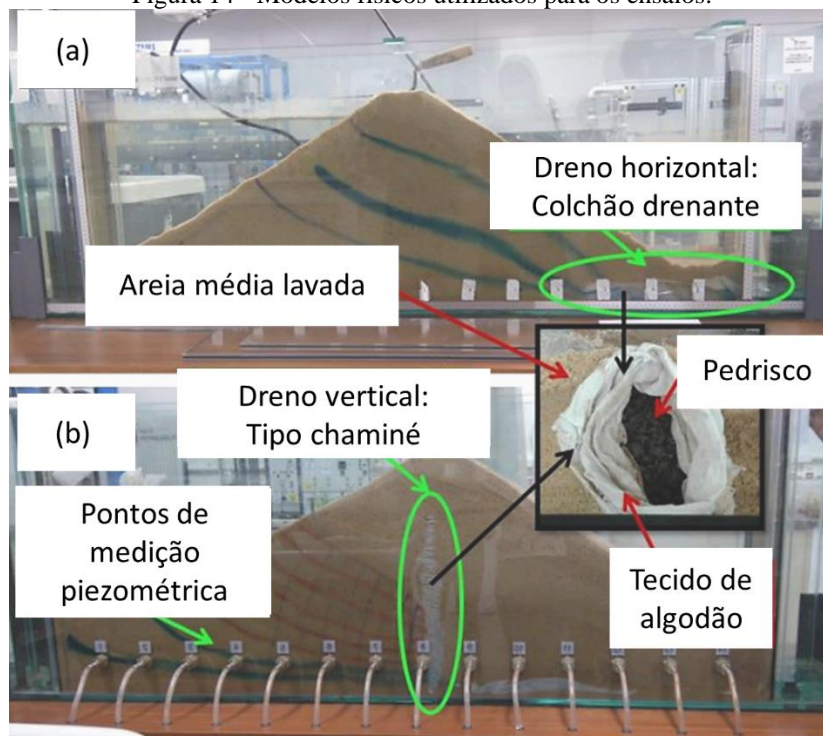
Já o trabalho de Jorge (2013) avaliou o processo de ruptura em barragens de terra com geometria fixa modificando apenas grau de compactação do material que compõe as barragens ensaiadas. Foi adotada uma mistura granulométrica argilosa e arenosa, de modo a testar a principal variável em análise neste estudo experimental: a energia de compactação de cada aterro. Considerou-se uma mistura granulométrica com uma relação de argila e areia de 1:2, o que representa uma barragem de terra típica em Portugal. Na sequência de um teste preliminar realizado, no qual se construiu um pequeno aterro experimental com esta mistura

granulométrica, concluiu-se que a relação de argila e areia adotada na mistura (1:2) era excessivamente plástica para induzir rupturas por gálgamento nestes aterros, uma vez que o potencial erosivo do escoamento, a dada altura, era insuficiente para dar continuidade à evolução da brecha de ruptura. Foi adotada uma mistura granulométrica de relação menos argilosa e mais arenosa. Os aterros experimentais foram construídos com cinco camadas e foram compactados com o número de golpes de modo a chegar em uma compactação de aproximadamente 82% e 90% (foi realizado um teste anterior com um aterro “piloto” para identificar quantos golpes seriam necessários para chegar nesse grau de compactação).

Concluiu-se que a magnitude dos hidrogramas efluentes é inversa ao grau de compactação, ou seja, a vazão de pico estimado para ruptura do aterro com menor grau (82%) de compactação foi sensivelmente o dobro do pico da vazão efluente estimado para o ensaio experimental em que o grau de compactação da barragem de aterro era mais elevado (95%). Os graus de compactação dos aterros têm relação direta com o tempo de ruptura, sendo que, para o aterro com menor grau de compactação (82%), o período necessário para a total ruptura do aterro foi de apenas 100 segundos; este tempo de ruptura foi cerca de dez vezes superior (1000 segundos), para o aterro com maior grau de compactação.

Oliveira et al. (2018) realizou o estudo comparativo de três métodos (analítico, numérico e físico) em barragens de terra homogêneas, a fim de analisar a concordância dos resultados para os diferentes modelos. Foram selecionados dois tipos de controle de fluxo: o de dreno tipo colchão drenante (Figura 14a) e o de dreno tipo chaminé (Figura 14b). Para a realização dos experimentos, utilizou um canal de vidro com um sistema de medições piezométricas. Para o corpo da barragem utilizou-se areia quartzosa média lavada, sendo sua compactação realizada manualmente, devido às limitações práticas (compactação realizada em camadas de pequena espessura). Escolheu-se a areia devido à sua maior permeabilidade, pois o processo de fluxo ocorre mais rapidamente e esse material permite a visualização das linhas de fluxo (com corantes) mais facilmente. Para os drenos do modelo físico utilizou-se pedrisco envolto em tecido de algodão. Os resultados mostram que as linhas de fluxo obtidas com cada um dos métodos possuem comportamento semelhante, porém quando são comparados os valores de poro-pressão medidos ao longo da barragem, observa-se discrepância entre os dados, chegando-se a um erro médio de 18,4%, entre os modelos analítico e físico. No entanto desconsiderando o método analítico, chega-se a um erro médio de 6,8% entre os métodos computacional e físico. Desta forma, sugere-se que os modelos físicos podem ser utilizados com resultados satisfatórios como ferramentas didáticas para o estudo do fluxo.

Figura 14 - Modelos físicos utilizados para os ensaios.



Fonte: Adaptado de Oliveira et al., 2018.

Trautwein et al. (2022) analisou o comportamento e as deformações das barragens de terra de forma a obter conhecimentos dos modos de percolação da água no maciço até o seu rompimento da barragem.

Os modelos reduzidos utilizados tinham escala de 1:100 e para realização dos experimentos foram escolhidos dois perfis de barragens, com taludes de inclinações iguais em montante e jusante de 1:1.25 e 1:1.50 que correspondem a rampas com inclinações de aproximadamente 39° e 34°. Quanto ao material para a construção do modelo foi utilizado um solo coletado em uma jazida no município de Itajubá – MG que foi classificado como silte elástico arenoso de acordo com o Sistema Unificado. De maneira que a construção dos modelos se aproximasse das barragens reais, foram adotados procedimentos de peneiramento do material, compactação por camadas e controle de alinhamento e nivelamento. Quanto aos comportamentos que precedem as rupturas observou-se que para os dois modelos ensaiados, as primeiras deformações acontecem na crista da barragem, seguidas de deformações no topo do talude de jusante, topo de talude de montante e base do talude de jusante. Devido ao maior volume de material, maior peso próprio, o modelo 1:1.50 apresentou maior resistência ao início das deformações e maior tempo para ocorrência da ruptura.

Na Figura 15 é apresentada as etapas de construção dos modelos físicos utilizadas, na qual a Figura 15a apresentada a marcação lateral no tanque com as graduações em “cm”. Na Figura 15b a etapa de construção realizando o peneiramento do material e a compactação por camadas. A Figura 15c apresenta o alinhamento e nivelamento e na Figura 15d a barragem com inclinação de 1:1,50 e na Figura 15e a barragem com inclinação de 1:1,25. O início do rompimento é visualizado na Figura 15f.

Figura 15 - Etapa de construção dos modelos físicos utilizados para elaboração do trabalho do Daniel et al. (2022).



Fonte: Daniel et al., 2022.

3.6 Hidrograma de Ruptura

Para simular um evento de ruptura é necessário primeiramente elaborar o hidrograma efluente no momento da ruptura, o qual representa graficamente a variação da vazão efluente da barragem no tempo. A partir desse hidrograma, se estabelece a vazão de pico (Q_p) caracterizada pelo maior valor obtido (topo de hidrograma) em um determinado instante de tempo (FARIA, 2019). Tradicionalmente, esse hidrograma de ruptura é confeccionado a partir de equações empíricas para determinação da vazão de pico (Q_p) e de valores de tempo de pico (T_p) definidos em função das características da barragem e da evolução da brecha de ruptura (GALEANO, 2016).

As diferentes formulações matemáticas para a determinação da vazão de pico (Q_p) relacionam a máxima vazão de descarga com características da barragem (altura do barramento, comprimento da crista, volume do reservatório, por exemplo). A Tabela 2 apresenta algumas das equações utilizadas para o cálculo da vazão de pico (FARIA, 2019).

Tabela 2 – Fórmulas matemáticas para obtenção da vazão de pico (Q_p).

Método	Equação	Definição
Lou (1981) apud Mascarenhas (1990)	$Q_p = 7,683 H_d^{1,909}$	Equação baseada na análise de 19 diferentes casos de ruptura de natureza diversa.
Hagen	$Q_p = 1,205 (H_d V_m)^{0,48}$	Equação baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de ruptura.
Saint-Venant apud U.S. Army Corps of Engineers (1997)	$Q_p = \frac{8}{27} B_d \sqrt{g} Y_{médio}^{\frac{3}{2}}$	Equação desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento.
Schoklistch (1917) apud ICOLD (1998)	$Q_p = \frac{8}{27} \left(\frac{B_d}{B_b}\right)^{\frac{1}{2}} B_d \sqrt{g} Y_{médio}^{\frac{3}{2}}$	Equação considerando a situação em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem.
Bureau of Reclamation (1982) apud Bureau of Reclamation (1987)	$Q_p = 19 H_d^{1,85}$	Equação baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina d'água no reservatório no momento da ruptura.
Vertedor de Soleira Espessa (Singh, 1996)	$Q_p = 1,7 B_b H_b^{3/2}$	De acordo com Singh, o escoamento que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao escoamento que passa por um vertedor retangular de soleira espessa.

Método	Equação	Definição
Wetmore e Fread (1981) apud French (1985)	$Q_p = 1,7 B_b \frac{1,94 \frac{A_s}{B_b}}{T_p + \frac{1,94 A_s}{B_b \sqrt{H_D}}}$	Equação considerando a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t).
Froelich (1995)	$Q_p = 0,607 V_w^{0,295} H_d^{1,24}$	Equação baseada em 22 casos de rompimento em barragem de terra (piping e galgamento)
Pierce (2010)	$Q_p = 0,016 (V_w H_d)^{0,606}$	Equação considerando 87 rompimentos por piping e galgamento).

A_s = área do reservatório para o nível de água máximo (m²);

B_b = largura final da brecha (m);

B_d = largura da barragem (m);

H_b = altura final da brecha (m);

H_d = altura da barragem (m);

Q_p = vazão máxima defluente da barragem em ruptura (m³/s);

T_p = tempo para desenvolvimento da brecha (s);

V_m = volume máximo do reservatório para o nível de água máximo (m³);

V_w = volume de água imediatamente antes da ruptura da barragem (m³);

$Y_{médio}$ = profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m).

Fonte: Galeano, 2016 e Faria, 2019.

O tempo de pico (T_p) está relacionado ao tempo de evolução da brecha e normalmente é definido a partir de tabelas relacionadas às características das barragens e do tipo da brecha, baseado em casos históricos similares ou formulações mais robustas que consideram o desenvolvimento da brecha com base em princípios da hidráulica, do transporte de sedimentos e da mecânica dos solos. Na Tabela 3 são apresentados os valores a serem considerados para as características das brechas de barragens de terra/enrocamento.

Tabela 3 - Possíveis valores a serem considerados para as características das brechas.

Tipo de Barragem	Comprimento da Brecha (B_b)	Forma da ruptura/ Profundidade da brecha*	Tempo de Ruptura T_p (horas)	Referência
Terra/ Enrocamento	$(0,5 \text{ a } 0,3) \times H_d$	Entre 0 e 1	0,5 a 4,0	USACE (1980)
	$(1,0 \text{ a } 5,0) \times H_d$	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	FERC (1988)
	$(2,0 \text{ a } 5,0) \times H_d$	Entre 0 e 1	0,1 a 1,0	Fread (2006)
	$(2,0 \text{ a } 4,0) \times H_d$	Entre 0,25 e 1	0,1 a 1,0	ELETRORÁS (2003)

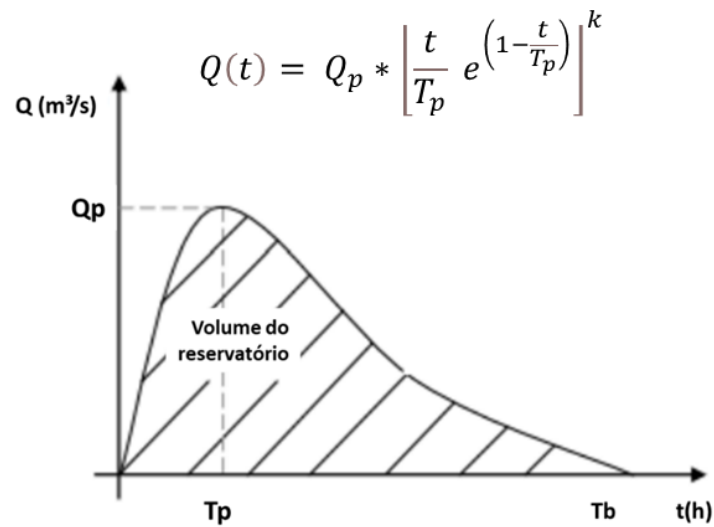
H_d = altura da barragem (m)

* Declividade da lateral da brecha entre os valores citados para as respectivas referências.

Fonte: Adaptado de Faria, 2019.

Com a vazão de pico (Q_p), tempo de pico (T_p) e tempo de base (T_b – tempo total) pode-se confeccionar o hidrograma de ruptura (Figura 16). A determinação do hidrograma de ruptura da barragem é baseado no hidrograma com decaimento parabólico que é mais condizente com casos já ocorridos em barragens de terra e por caracterizar de modos gradual o esvaziamento do reservatório (DA SILVA E RIBEIRO, 2018; FARIA, 2019; MACHADO, 2022).

Figura 16 -Hidrograma de decaimento parabólico.



Fonte: Faria, 2019.

Q_p = vazão de pico (m^3/s);

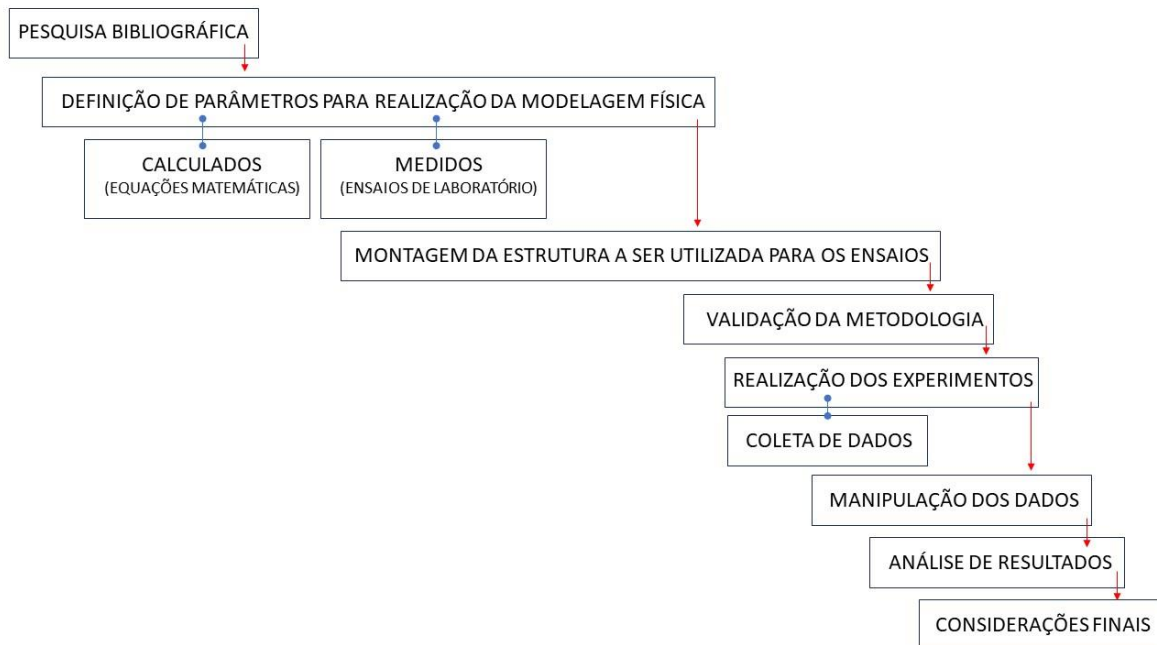
T_p = tempo de pico (h);

k = varia de 0,1 até 0,5 sendo calibrado de tal modo que o volume do hidrograma de ruptura seja igual ao volume do reservatório no momento do rompimento, valor usual = 0,5.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 17.

Figura 17- Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para alcançar o objetivo deste trabalho, primeiramente, foi realizada a pesquisa bibliográfica, onde buscou-se na literatura referências que servissem como base para a compreensão do rompimento de barragens de terra por galgamento. O levantamento de dados de rupturas históricas permitiu encontrar embasamento científico necessário para justificar o seu andamento.

Optou-se por utilizar modelagem física como ferramenta pelo fato de ser comumente utilizada na literatura e por permitir a imersão e a compreensão dos desafios relacionados com a construção destas estruturas em todas suas etapas. Foi necessário engajamento no processo desde a escolha do material, construção do maciço, enchimento do reservatório até a ruptura propriamente dita, o que permitiu a observação e a experiência prática em todas as fases do processo.

Antes da montagem e realização dos ensaios foi necessário definir os parâmetros para execução e construção do barramento, que teve sua geometria (altura, inclinação e comprimento da crista da barragem) definida de acordo com o levantamento bibliográfico realizado com base em experimentos já executados e em dados de rupturas históricas.

Os ensaios foram realizados no Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade situado no Instituto de Pesquisa Hidráulicas da UFRGS e para sua execução foi construído um canal de acrílico transparente em que foi realizada a construção do maciço de terra. Esse maciço possui um reservatório de montante com um sistema de alimentação de água limpa que permitiu ensaiar diferentes hidrogramas de entrada.

Para coleta de resultados foi utilizado um medidor de vazão, câmeras de vídeos que permitiram a completa visualização do fenômeno, um cronômetro para mensurar o tempo, escalas que permitiram mensurar unidades de comprimento e um piezômetro instalado no final do canal que registrou o nível de água correspondente a onda de ruptura (no qual posteriormente foi gerado o hidrograma de ruptura).

Por fim foi realizada a manipulação e análise de resultados, através dos vídeos, imagens e dados coletados através do medidor de vazão e no piezômetro, utilizando planilhas de Excel que permitiram concluir a respeito dos ensaios realizados com foco no objetivo proposto por este trabalho.

4.1 Definição das Características da Barragem

Os parâmetros utilizados para a realização dos experimentos foram definidos de acordo com a literatura, principalmente levando em consideração os ensaios de simulação física em barragens de terra já realizados. Para tal, foram considerados os seguintes parâmetros para construção do maciço: altura, volume da barragem, largura, inclinação dos taludes, volume do reservatório e material a ser utilizado para montagem do maciço. Para caracterização do material foi realizada análise granulométrica e determinada sua compactação, densidade e umidade do solo.

Foi definida uma estrutura padrão (uma barragem hipotética) a partir da qual foi realizada as análises de semelhança para construção do modelo utilizado nas modelagens físicas.

4.1.1 Material Utilizado

Para definição do material a ser usado para construção do maciço utilizou-se como direcionamento o levantamento bibliográfico dos estudos realizados em barragens de terra utilizando modelagem física, conforme já mencionado no item 3.5 Modelagem Física.

Sendo o objetivo deste trabalho representar a realidade das barragens de terra construídas no Brasil, levando-se em consideração a maioria dos acidentes que ocorreram,

buscou-se utilizar um material com menor relação de areia em relação ao silte e argila, que permitisse a execução, realização e visualização do galgamento e da ruptura do barramento.

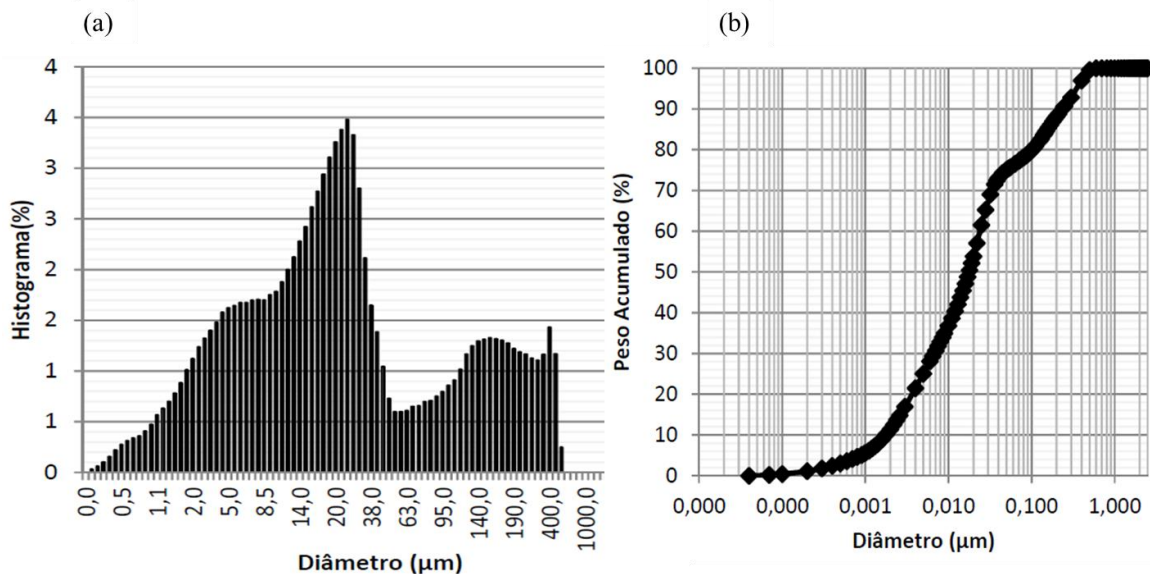
O material escolhido e utilizado para execução deste trabalho (Figura 18) foi coletado no município de Novo Hamburgo/RS e teve sua curva granulométrica (Figura 19) definida através de um analisador de partículas a laser – granulometro CILAS 11 80. A Figura 19a é referente a distribuição do tamanho de grão e a Figura 19b referente a distribuição do tamanho de grão acumulado. O material foi classificado como silte arenoso de acordo com a classificação Wentworth (1922) com as seguintes faixas granulométricas: 21,44% de argila, 55,04% silte e 23,52% areia).

Figura 18- Material utilizado para construção do maciço da barragem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

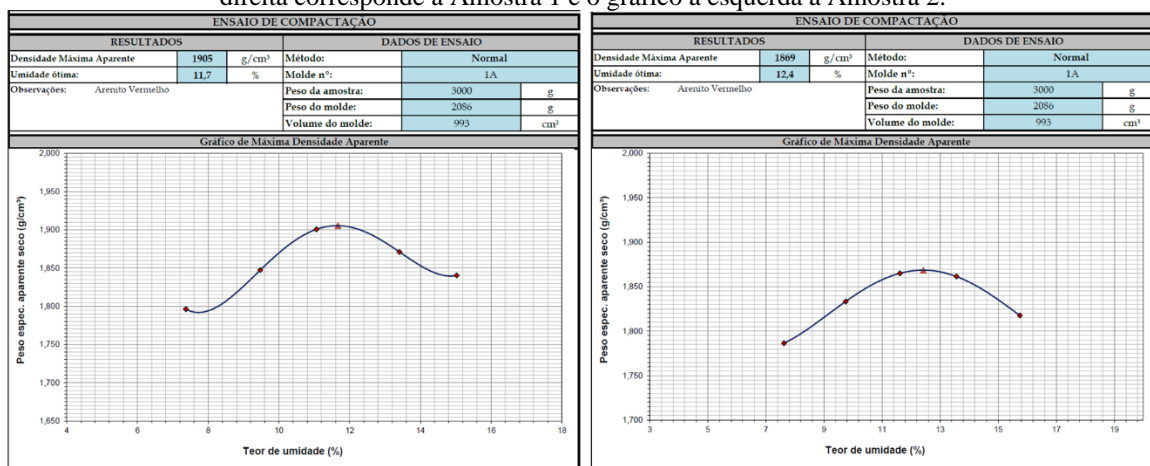
Figura 19 - Curva granulométrica da amostra de solo utilizada (Figura 19a) referente a distribuição do tamanho de grão e Figura 19b referente a distribuição do tamanho de grão acumulado).



Fonte: elaborado pelo autor.

Um dos motivos para utilização desse solo é que ele foi gentilmente disponibilizado para execução deste trabalho por uma empresa de engenharia atuante no município de Novo Hamburgo/RS. E também, juntamente com o solo foram disponibilizados os resultados dos ensaios de compactação (Proctor Normal) realizados em laboratório (Figura 20) de amostras de solo coletadas *in situ* (do mesmo local onde foi retirado o solo utilizado neste trabalho), o que permitiu determinar a densidade máxima aparente e a úmida ótima a ser considerada para a construção do maciço (Tabela 4). O Ensaio Proctor Normal é definido de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 1986), no qual possui uma energia de compactação definida (correspondente a 2,5 kgf).

Figura 20 – Resultados referente ao ensaio Proctor Normal das amostras de solo coletadas *in situ*. Gráfico a direita corresponde a Amostra 1 e o gráfico a esquerda a Amostra 2.



Fonte: resultados de laboratório disponibilizados pela empresa de engenharia de Novo Hamburgo/RS.

Tabela 4 - Umidade ótima e densidade máxima aparente da amostra de solo coletada *in situ*.

Resultado de laboratório das amostras coletadas <i>in situ</i> .		
Amostra	Umidade Ótima (%)	Densidade Máxima Aparente (kg/m ³)
1	11,7	1905
2	12,4	1869

Fonte: elaborado pelo autor.

Quando se compacta um solo com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução dos vazios, porém quando se compacta um solo com umidade alta a água provoca um efeito de lubrificação e deslizamento de partículas o que melhora a compactação e diminui o índice de vazios, porém se tiver muita umidade a água vai ocupar todos os vazios e o solo vai apresentar um grau de saturação elevado e a água vai ocupar os vazios que poderiam ser ocupados pelos grãos (CAMPOS, s.d). Assim, para uma determinada energia aplicada, existe uma umidade ótima que conduz a um peso

específico seco máximo, conforme apresentado nos gráficos da Figura 20, ou seja, conhecida a curva de compactação do pode-se determinar a umidade ótima necessária à compactação do material para a obtenção do grau de compactação desejado.

Estes resultados são de suma importância, porque conhecendo a umidade ótima do solo e a densidade máxima aparente, será possível chegar ao grau de compactação pretendido, utilizando uma mesma energia de compactação. No Brasil, para construção de barragens de terra, são utilizados grau de compactação iguais a 95%, 98% e 100% (SALIBA, 2009).

4.1.2. Geometria da Barragem

Para determinação da altura e do volume da barragem a ser ensaiada foram utilizados como base os dados disponíveis nos Relatórios de Segurança de Barragens dos anos de 2020 e 2021, considerando barragens que sofreram acidentes (ANA, 2020 e 2021). Na Tabela 5 é possível observar que a maioria destas barragens (77 % das barragens) possui altura menor que 10 metros. Considerando-se isto, foi adotada a altura da barragem a ser ensaiada em 9 metros.

Tabela 5 - Barragens presentes nos Relatórios de Segurança de Barragens que sofreram acidentes nos anos de 2020 e 2021.

Ano	Acidente (*)	Barragem	Altura (m)	Volume (hm ³)
2020	1	PCH Serra das Agulhas	20,5	3,95
	4	Pontal em Quiterianópolis	11	2,20
	10	Condomínio Paquetá	6	0,027
	11	Barragem 2 da Fazenda Santa Cruz	3	0,003
	12	Fazenda Santa Cruz	3	0,01
	13	Propriedade do Sr. Luís Antônio	5	0,006
	14	Fazenda Beira Lago/das Flores.	10,2	0,035
	15	Fazenda Estiva 1	5	0,043
	16	Hidrolina – afetada 1	2	0,002
	17	Hidrolina – afetada 2	3	0,014
	18	Fazenda São Lourenço	8	0,343
	20	Das Antas	8	0,35
	21	Sítio Caldeirão	15	0,90
	22	Córrego do Açude – Sítio Olhos D'água	3	0,007
	24	Córrego do Retiro	12	0,288
25	Fazenda Gravatá	12	0,087	
2021	1	Pirocaua	7	0,16

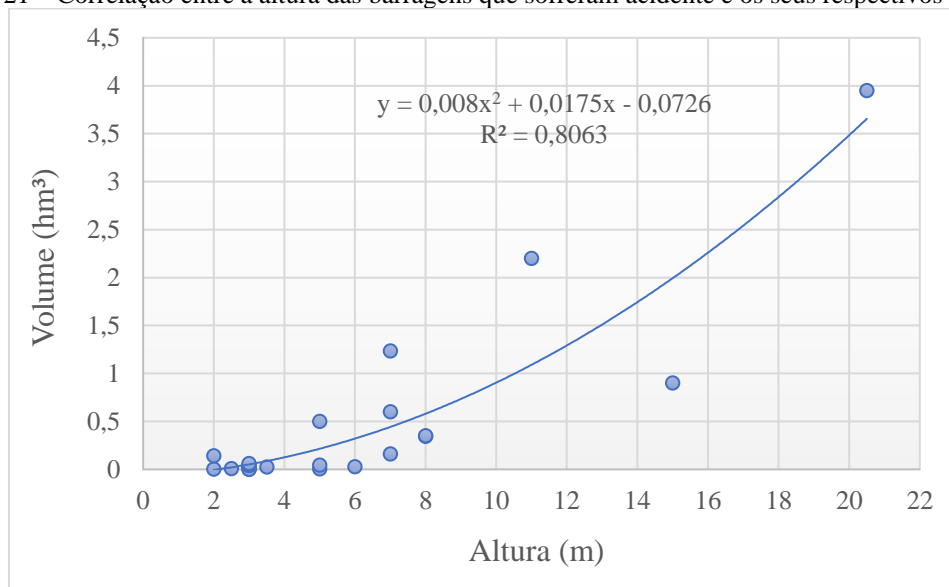
Ano	Acidente (*)	Barragem	Altura (m)	Volume (hm ³)
	2	Jussiape	7	1,234
	5	Goiatuba/Vila Betânia	2,5	0,007
	6	Curral de Dentro 01	7	0,60
	7	Curral de Dentro 02	5	0,50
	8	Curral de Dentro 03	2	0,140
	9	Curral de Dentro 04	3	0,040
	10	Curral de Dentro 05	3	0,040
	11	Curral de Dentro 06	3	0,06
	13	Rompimento comporta	3,5	0,023

(*) O número do acidente, representado nesta tabela, está relacionado ao mesmo número que é apresentado nestes relatórios, o que pode servir de orientação para pesquisas e aprofundamentos futuros.

Fonte: ANA, 2020 e 2021.

Para determinação do volume foi realizada a correlação entre a altura e o volume destas barragens (Tabela 5). Ressalta-se que para fazer essa correlação foram descartadas as barragens 14, 24 e 25 do ano de 2020, devido às causas de rompimento apresentadas no 7.1 ANEXO B. Na Figura 21 é possível verificar a equação gerada em função da altura.

Figura 21 – Correlação entre a altura das barragens que sofreram acidente e os seus respectivos volumes.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a utilização da equação apresentada na Figura 21, considerou-se que a barragem a ser ensaiada possui 9 metros, com borda livre corresponde a 2 metros (22% da altura total da barragem), resultando em uma altura de 7 metros para determinação (correspondente ao valor de x na equação) do volume do reservatório, cujo cálculo resultou em 0,4419 hm³.

A largura da crista (Ac) da barragem foi determinada pelo método de USBR, apresentado na Tabela 6, resultado no valor de 4,8 metros.

Tabela 6 - Equações empíricas para estabelecer a largura da crista barragem.

Método	Equação	OBS:
USBR	$Ac = \frac{Hd}{5} + 3$ <p>Hd = Altura da barragem (m)</p>	<p>Para todos os tipos de barragens de terra, a largura mínima da crista deverá ser de 3 m. Se a barragem for utilizada como estrada, a largura mínima será de 6 m.</p> <p>Fonte: Eletrobrás, 2000.</p>

Fonte: Meirelles, 2014 e Eletrobrás, 2000.

Após a definição da altura da barragem e a largura da crista definidas, definiu-se inclinação dos taludes. A inclinação dos taludes da barragem é caracterizada pelo coeficiente de inclinação “ m ”, que indica quantas vezes a projeção horizontal é maior que a projeção vertical. Esse coeficiente depende do tipo de barragem, do material empregado, da altura da barragem e do material da fundação (ELETROBRÁS, 2000). A Tabela 7 apresenta os valores usuais do coeficiente de inclinação dos taludes.

Tabela 7 – Coeficientes de inclinação dos “ $m : 1V$ ” dos taludes (*).

Material do Corpo da Barragem		Altura da Barragem – Hd (m) (**)	
		Hd ≤ 5 m $m : 1V$	5 < Hd ≤ 10 $m : 1V$
Solos Argilosos	Montante (m_1)	2,00	2,75
	Jusante (m_2)	1,75	2,25
Solos Arenosos	Montante (m_1)	2,25	3,00
	Jusante (m_2)	2,00	2,25
Areias e Cascalhos	Montante (m_1)	2,75	3,00
	Jusante (m_2)	2,25	2,50

(*) Valores usuais considerando-se que o material de fundação não condiciona a estabilidade do talude (casos nos quais as fundações são mais resistentes que os maciços compactados das barragens).

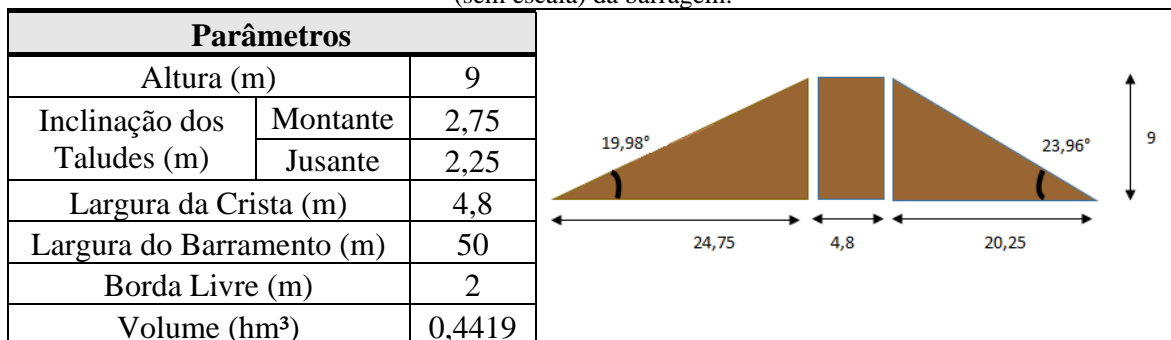
(**) Para barragens com altura > 10 m podem ser usadas as mesmas inclinações dos taludes para as barragens de terra, desde que a estabilidade da barragem seja verificada para os casos correntes de carregamento (“Final de Construção”, “Operação Normal” e “Esvaziamento Rápido”), utilizando-se, por exemplo, a metodologia consagrada de cálculo, do “US Corps of Engineers - Engineering and Design Manual EM 1110-2-1902” - April 1970 - Stability of Earth and Rockfill Dams (Instruções para Estudos de Viabilidade, da ELETROBRÁS /DNAEE). Para as barragens de enrocamento convencionais (como apresentado mais adiante) os taludes devem ter, no mínimo, uma inclinação de 1(V): 1,65(H).

Fonte: Eletrobrás, 2000.

Sendo assim, para definição da inclinação dos taludes ($m: 1V$), considerou-se como material do corpo da barragem o solo argiloso e a altura do barramento de 9 metros, o que de acordo com a Tabela 7 resulta em uma inclinação de 2,75 para montante (m_1) e 2,25 para jusante (m_2).

Na Figura 22 é apresentado o resumo dos parâmetros adotados para a barragem de terra e uma imagem (sem escala) para representação do barramento e suas respectivas medidas.

Figura 22 - Resumo dos parâmetros considerados para construção do modelo e imagem de representação (sem escala) da barragem.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.1 Análise de Semelhança

Para a realização dos ensaios foi construído um modelo reduzido da barragem estudada. Para isso, foi necessário determinar a escala geométrica do modelo, no qual foi adotada a escala de 1:100.

Para relacionar a geometria do modelo com a geometria da estrutura real, utilizou-se a teoria da semelhança dinâmica (MOTTA, 1972). Para determinar a relação entre os valores observados no modelo e os valores reais (protótipo), é necessário analisar conceitualmente o problema e avaliar quais fenômenos hidráulicos prevalecem. Desta forma, com o objetivo de realizar os ensaios de galgamento de barragens de terra, o aspecto a preservar na determinação das escalas é a semelhança do número de Froude, conforme apresentado no Quadro 5 (JULIEN, 2002). O número de Froude pode ser calculado utilizando de acordo com a Eq. 1.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (\text{Eq.1})$$

V = é a velocidade do fluido (m/s);

g = a aceleração da gravidade (m/s²);

D = a profundidade do fluido (m).

Quadro 5 – Relações das escalas derivadas obtidas com o número de Froude.

Descrição	Equação (*)	Escala	Modelo	Protótipo
Dimensão linear	$L = nl$	n	l	L
Área	$A = n^2a$		a	A
Volume	$W = n^3w$		w	W
Vazão	$Q = n^{2,5}q$		q	Q
Tempo	$T = n^{0,5}t$		t	T

Fonte: Julien, 2022.

A aceleração da gravidade permanece constante no modelo e no protótipo, assim $gravidade = \frac{g_{prototipo}}{g_{modelo}} = 1$. O modelo usa água como fluido, e, uma vez que a escala para aceleração da gravidade é 1, as escalas para densidade (ρ), peso específico (γ), viscosidade dinâmica (μ) e viscosidade cinemática (ν) são também unitárias.

Já na Tabela 8 são apresentados valores calculados correspondentes ao protótipo e o modelo. Foi adotado o modelo em escala reduzida com leito fixo (o leito sob a barragem não sofre processos erosivos) e o fluido utilizado foi água limpa.

Tabela 8 - Resumo dos valores adotados para o protótipo e modelo.

Parâmetros		Protótipo	Modelo
Escala		1:100	
Altura		9 m	9 cm
Inclinação dos Taludes	Montante	2,75 m	2,75 cm
	Jusante	2,25 m	2,25 cm
Largura da Crista (L menor)		4,8 m	4,8 cm
Largura da Base (L maior)		49,8 m	49,8 cm
Largura do Barramento		50 m	50 cm
Borda Livre		2 m	2 cm
Volume do Reservatório		4441900 m ³	0,4419 m ³

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ressalta-se que devido as limitações estruturais para construção do modelo o volume do reservatório para as simulações foi de 0,26 m³.

4.2 Métodos Aplicados para Realização dos Ensaios

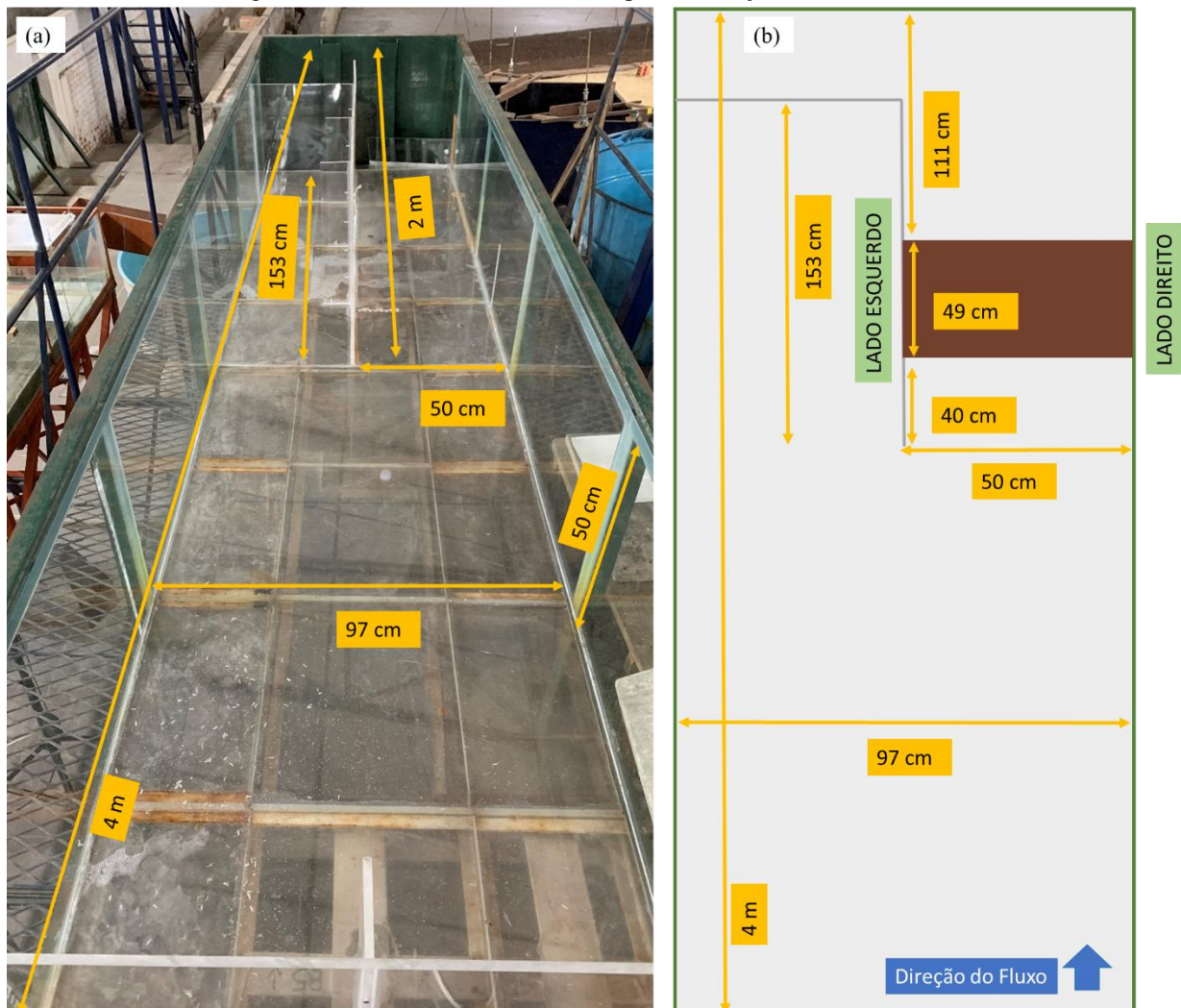
Neste item é apresentado a metodologia utilizada para a realização dos ensaios assim como a descrição da estrutura e dos métodos utilizados.

4.2.1 Estrutura Utilizada para os Ensaios

Para a execução dos ensaios foi construída uma estrutura em acrílico, com as dimensões definidas a partir dos valores calculados para o modelo, que foi disposta em um canal de vidro. Esse processo foi necessário para delimitar as dimensões da barragem e do reservatório, possibilitando sua construção na escala desejada.

O canal de vidro possui 0,97 m de largura, 4 m de comprimento e 0,5 m de altura e declividade nula (conforme Figura 23a). Na Figura 23b é apresentada as dimensões da estrutura em acrílico (vista superior) depositada dentro do canal, sendo que o volume total do reservatório da barragem é de 0,26 m³.

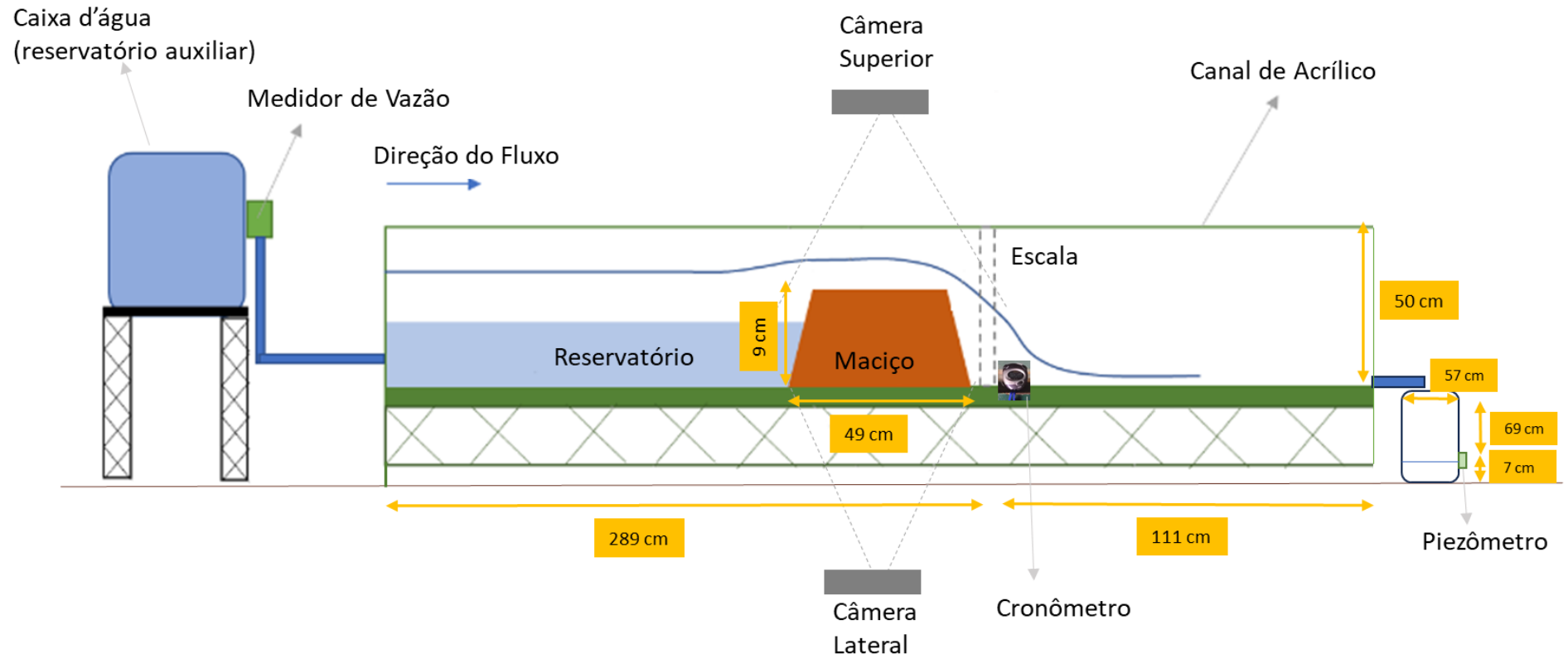
Figura 23 - Canal de acrílico utilizado para realização dos ensaios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O croqui da estrutura utilizada para realização dos ensaios pode ser visualizado na Figura 24.

Figura 24 - Croqui da estrutura utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 24 é representada a estrutura utilizada para realização do ensaio. A caixa d'água (reservatório auxiliar) foi responsável por realizar a alimentação de água no sistema, fornecendo uma alimentação contínua durante o ensaio. Um medidor de vazão eletromagnético foi instalado na tubulação de saída da caixa d'água para mensurar a vazão e o volume injetado durante o ensaio. Para os registros de vídeo e fotos foi instalado um iPad na parte superior do canal (câmera superior) no qual capturou as imagens superiores do maciço e um iPad lateral (câmera lateral) que registrou as imagens laterais do maciço (um dos principais registros foi a percolação de água no maciço). Foi instalada uma escala na parede direita do canal, próximo ao maciço, para auxiliar com os níveis de enchimento e durante todo o ensaio foi utilizado um cronômetro para registrar o tempo no qual os processos ocorriam. Por fim, no final do canal, foi instalado um reservatório com um piezômetro para coletar a água proveniente da ruptura da barragem, que realizou a mensuração do nível de água a cada 5 segundos. O piezômetro foi instalado a 7 cm da base do reservatório, sendo que o volume útil do reservatório é de 170 litros. Como o nível d'água foi medido a cada 5 segundos e as dimensões do reservatório eram conhecidas, foi possível determinar a vazão de ruptura.

4.2.2 Preparação do Material

A primeira atividade a ser realizada com o solo em seu estado natural foi a coleta de amostras para determinação da umidade. Foram coletadas ao total sete amostras. Os resultados podem ser verificados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado da umidade correspondente ao solo em seu estado natural.

Amostra	Umidade (%)
1	21,0
2	21,2
3	21,4
4	20,1
5	20,5
6	19,5
7	20,3

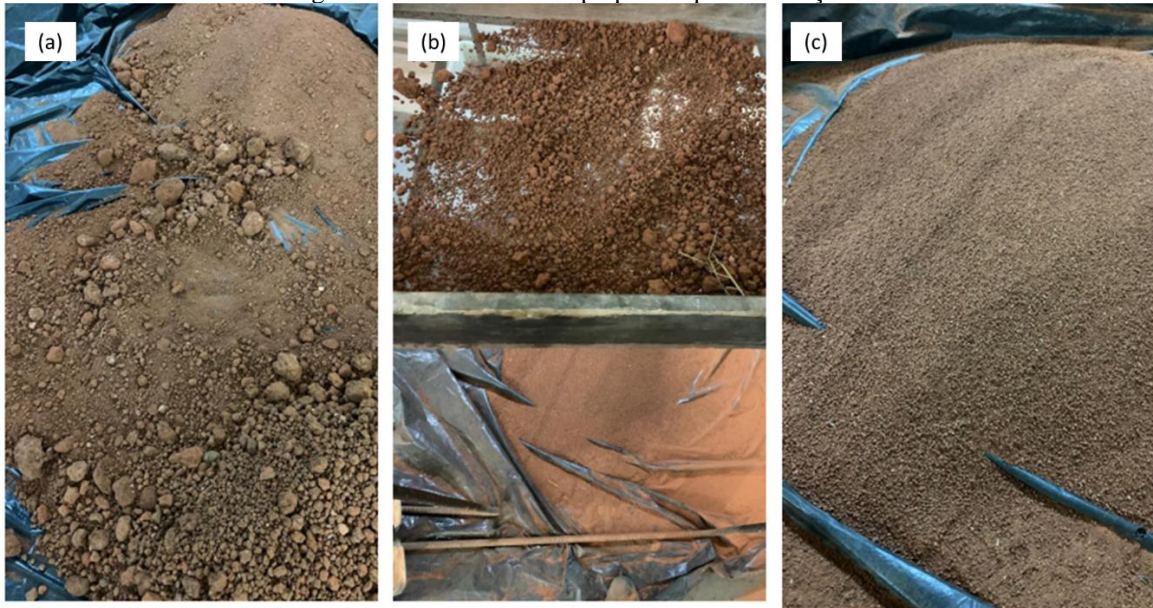
Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro ponto a ser considerado, antes da construção do maciço, é que a umidade do solo natural (Tabela 9) estava acima do valor corresponde para umidade ótima,

equivalente a 11,7% e 12,4%, conforme Tabela 4, então foi necessário dispor este material sobre uma lona para secar naturalmente (Figura 25).

Após o solo ficar exposto, durante uma semana, foi realizado o seu peneirado em uma peneira de 4 mm. A Figura 25a apresenta o solo em seu estado natural secando sobre a lona, no qual observa-se diferentes tamanhos de grãos, já a Figura 25b o processo de peneiramento e a Figura 25c o solo peneirado que foi utilizado na construção da barragem.

Figura 25 - Material sendo preparado para utilização.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, foram coletadas amostras deste solo e realizado novamente o teste de umidade e determinada a densidade e o grau de compactação do solo conforme descrito a seguir.

Para determinação da umidade foi, primeiramente, realizada a pesagem de um recipiente de vidro (peso do recipiente). Após, neste recipiente, foi adicionado o solo peneirado em sua condição natural de umidade e realizada novamente sua pesagem (recipiente + solo úmido). Posteriormente este conjunto (recipiente + solo úmido) foi colocado em uma estufa com uma temperatura de 100° durante 24 horas. Ao final das 24 horas retirou-se este conjunto e finalmente realizou-se sua pesagem final (recipiente + solo seco). A umidade foi definida da seguinte forma (Eq. 2):

$$Umidade (\%) = \frac{(PRSU)-(PRSS)}{(PRSS)-(PR)} \quad (Eq.2)$$

$PRSU$ = peso recipiente do recipiente com o solo úmido (kg).

$PRSS$ = peso do recipiente com solo seco (kg)

PR = peso do recipiente (kg).

Buscou-se, corrigir a umidade do solo natural, com o objetivo de atingir a umidade ótima (conforme supracitado no item 4.1.1 Material Utilizado e correspondente a 11,7% para Amostra 1 e 12,4% para Amostra 2), necessária à obtenção do grau de compactação pretendido.

Para determinar a densidade do material foi utilizado um saco plástico, no qual foi disposto um cilindro de PVC com diâmetro interno de 9,9 cm e comprimento de 10,2 cm. Esse cilindro foi sendo preenchido com o solo e compactado com um peso de 2 kg em camadas de 2 cm, até seu volume ser completamente preenchido, conforme Figura 26a. Após, foi realizada a limpeza do material excedente ao redor do cilindro, retirado o cilindro, coletado o solo no saco plástico e executada a sua pesagem (Figura 26b). Com o peso do material e o volume (volume conhecido de 46,8 cm³) foi possível determinar a densidade do solo (numerador da Eq. 3), que é uma razão entre massa pelo volume.

Figura 26 - Determinação da densidade do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para definir o grau de compactação foi necessário utilizar os resultados referentes a densidade do solo e comparar com a densidade máxima aparente (conforme supracitado no item 4.1.1 Material Utilizado a qual corresponde ao valor de 1905 kg/m³ para Amostra 1 e

1869 kg/m³ para Amostra 2). Buscando-se alcançar um valor para o grau de compactação entre 85% e 100% e o cálculo pode ser realizado conforme (Eq. 3).

$$\text{Grau de Compactação (\%)} = \frac{\text{Densidade do Solo} = \frac{\text{Peso do Material}}{\text{Volume do Cilindro}}}{\text{Densidade Máxima Aparente (1905 kg/m}^3 \text{ e 1869 kg/m}^3)} \quad (\text{Eq. 3})$$

4.2.3 Construção do Maciço no Canal

Para a construção do maciço da barragem no canal de experimentos foi desenhado nas paredes do canal a geometria do maciço, conforme apresentado na Figura 27. Esse procedimento foi realizado para garantir que em todos os ensaios a posição do maciço fosse a mesma e, também, para permitir identificar possíveis deformações oriundas do enchimento do reservatório.

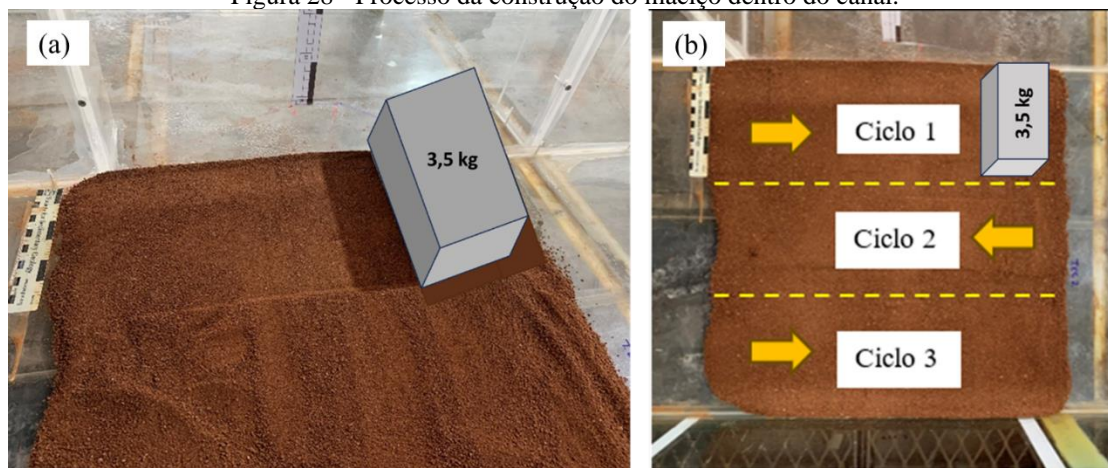
Figura 27- Desenho da geometria do maciço no canal de acrílico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo foi compactado dentro do canal de acrílico, em camadas de 2 cm, Figura 28a, utilizando um peso de aproximadamente 3,5 kg no qual os golpes foram aplicados de forma homogênea a uma altura de 5 cm. A compactação foi realizada em três ciclos, para cada camada, totalizando 30 golpes ao total, conforme Figura 28b. O resultado da construção do maciço pode ser visualizado na Figura 29.

Figura 28 - Processo da construção do maciço dentro do canal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29- Resultado da construção do maciço no canal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Ensaio Realizados

Para o cumprimento dos objetivos propostos nesse trabalho foram realizados três ensaios ao total, os quais estão descritos a seguir:

- a) Ensaio Teste – Foi realizado um ensaio inicial para validar a metodologia proposta e determinar a vazão de ruptura. O enchimento do reservatório foi realizado em duas etapas. Na etapa I iniciou-se, até a altura de 7 cm, o enchimento lento do reservatório e após atingir 7 cm foi realizado o acréscimo

da vazão (etapa II) que representou um enchimento rápido do nível da borda livre até o rompimento.

- b) Ensaio 1 – Neste ensaio foram ajustados os parâmetros, julgados necessários a partir do Ensaio Teste, como diâmetro do material, umidade e compactação do material. A partir dos resultados obtidos no Ensaio Teste em relação ao enchimento do reservatório e a percolação de água no maciço, neste ensaio optou-se por realizar o enchimento rápido do reservatório até a altura de 7 cm (etapa I) e após essa altura (etapa II) foi realizado o enchimento lento, que correspondeu a menos da metade da vazão de ruptura utilizada no Ensaio Teste.
- c) Ensaio 2 – Neste ensaio foi utilizada a mesma vazão de ruptura do Ensaio 1 e o diâmetro do material se manteve o mesmo. O diferencial deste ensaio é que se realizou a primeira etapa do enchimento do reservatório até aproximadamente o nível da crista (8 cm), diferente dos outros ensaios que foi até o nível da borda livre (7 cm), com um enchimento caracterizado rápido. Após atingir a altura de 8 cm foi realizado um enchimento lento até a ruptura.

Na Tabela 10 é apresentado a caracterização dos ensaios realizados de acordo com o modo de enchimento e o tamanho do material utilizado.

Tabela 10 - Caracterização dos ensaios realizados.

Ensaio	Etapa 1 - Nível	Etapa 1 – Enchimento	Etapa 2 - Nível	Etapa 2 – Enchimento	Diâmetro máximo do material (mm)
Teste	0-7 cm	lento	7-9 cm	rápido	4
1	0-7 cm	rápido	7-9 cm	lento	2
2	0-8 cm	Rápido	8-9 cm	lento	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir são apresentadas as definições adotadas para o enchimento rápido e lento, considerando a vazão média.

Lento = vazão de 0 até 11 l/min.

Rápido = vazão de 11 até 20 l/min.

4.2.4 Metodologia dos Resultados

A partir do solo em seu estado natural foi realizado o seu peneiramento para determinação do diâmetro máximo e coletadas amostras na qual permitiram realizar a caracterização do solo em relação a umidade, densidade e grau de compactação.

Em relação ao enchimento do reservatório foi possível determinar a vazão e volume injetados no canal através do medidor de vazão, que permitiu a elaboração do hidrograma de entrada (vazão ao longo do tempo). Com o hidrograma de entrada foi possível caracterizar se o enchimento foi rápido ou lento. Nesta fase também, através do iPad instalado na lateral direita do canal, foram obtidas imagens da percolação do maciço que permitiram visualizar o processo ao longo do tempo e posteriormente definir as linhas de fluxo a cada um minuto. O iPad instalado na parte superior captou a deformação que os taludes sofreram, a passagem de água para jusante da estrutura, a visualização do processo de galgamento e evolução da brecha de ruptura (abertura da brecha). O tempo de cada processo foi mensurado a partir de um cronômetro e o enchimento do reservatório se deu a partir de duas etapas (que consistiu em divisões de alturas de níveis da barragem). Esta divisão foi realizada com o objetivo de simular um reservatório que já estava operando com nível d'água máximo na borda livre e depois recebeu um incremento de vazão até a sua ruptura.

Após a ruptura foi coletado em um reservatório, em que estava instalado um piezômetro, o nível de água a cada 5 s proveniente da onda de ruptura, no qual o reservatório possuía dimensões conhecidas que permitiram a elaboração do hidrograma de ruptura e determinação da vazão e do tempo de pico. Os resultados obtidos referentes a vazão de pico foram comparados aos valores encontrados utilizando equações matemáticas disponíveis na literatura.

Com o término do ensaio, foi possível determinar o balanço de massa, no qual foi realizada a divisão do material em duas partes, caracterizando o material que ficou retido e o material que foi carregado pela onda de ruptura.

Por fim, foi realizada a análise de semelhança dos valores obtidos em laboratório com valores reais apresentados em situações de engenharia. Foi possível, também, comparar os valores referentes a equações matemáticas disponíveis na literatura com os resultados medidos.

Foram realizadas comparações de resultados entre os ensaios realizado e entre as etapas de enchimento do reservatório. Além da comparação com dois ensaios de modelagem física presentes na literatura e que foram realizados em barragens de terra.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados: Ensaio Teste, Ensaio 1 e Ensaio 2.

5.1 Ensaio Teste

O Ensaio Teste foi realizado para validar a metodologia para a realização das simulações físicas buscando entender como seria o comportamento do maciço e dos fenômenos associados para uma determinada vazão e tempo de enchimento do reservatório até a borda livre e, após, até a crista da barragem. Uma das principais análises deste ensaio foi avaliar o processo de ruptura do maciço, buscando-se predominantemente a ruptura por galgamento.

Para dar início ao ensaio, primeiro foi necessário definir alguns parâmetros relacionados ao solo utilizado, com o objetivo de entender posteriormente o impacto da mudança destes fatores no comportamento e rompimento do maciço. Para isso, foi separado uma quantidade de solo já peneirado para construção do maciço e a partir desta quantidade foram retiradas duas amostras para definir a umidade do solo. O grau de compactação e a densidade do solo foram determinadas para essa quantidade de material e podem ser verificadas na Tabela 11.

Ressalta-se que para cada ensaio foi realizado o mesmo procedimento de separação de uma quantidade de material, após peneirado, para definir a umidade, grau de compactação e densidade do solo.

Tabela 11 - Resultados referentes a caracterização do solo do Ensaio Teste.

Diâmetro Máximo	Umidade (%)		Densidade (kg/m ³)	Grau de Compactação
Até 4 mm	Amostra 1	14,0	1199	Para densidade 1905 kg/m ³ = 63%
	Amostra 2	8		Para densidade 1869 kg/m ³ = 64%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a montagem do maciço observou-se que a granulometria do material não estava uniforme (Figura 30) e que os grãos com maiores diâmetros estavam “soltos” na parte superficial dos taludes. Este foi o primeiro ponto que se identificou como necessário para ser modificado para os próximos ensaios, buscando uma uniformidade do solo para evitar a presença de vazios e uma melhor compactação do maciço e menor percolação de água.

Figura 30 – Granulometria do material na construção do maciço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a montagem do maciço, foi iniciado o processo de enchimento do reservatório, no qual se dividiu em duas etapas:

Etapa I – enchimento até a altura de 7 cm (correspondente ao nível de operação da barragem considerando uma borda livre).

Etapa II – enchimento da altura de 7 cm até 9 cm (correspondente a crista da barragem).

Esta divisão foi realizada com o objetivo de simular um reservatório que já estava operando com nível d'água máximo na borda livre e depois recebeu um incremento de vazão até a sua ruptura.

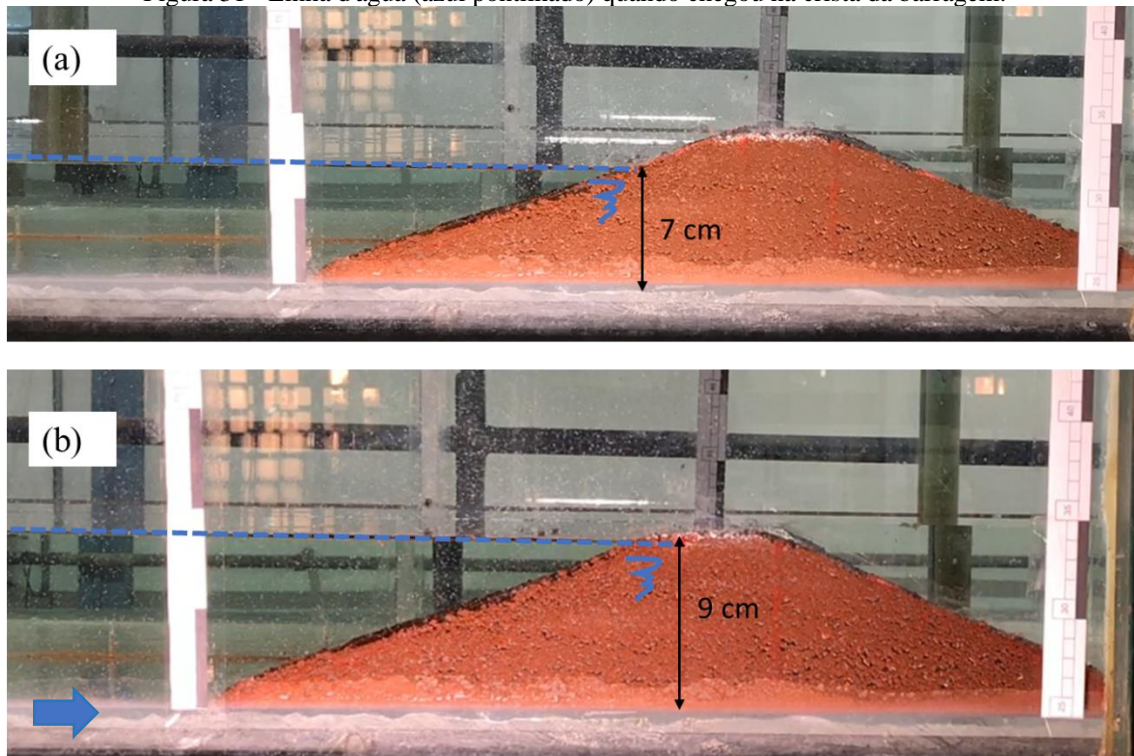
O resultado da primeira etapa do enchimento, até a altura de 7 cm, pode ser visualizado na Figura 31a, totalizando um volume de 215 litros injetados no reservatório. Este enchimento ocorreu em 20:20 minutos com uma vazão média de 10,64 l/min (com vazão máxima de 12,6 l/min por 5 min).

Após atingir a altura de 7 cm o ensaio foi pausado. Após esta breve pausa, foi iniciada a etapa II (enchimento de 7 cm até 9 cm), em que foi realizado o enchimento do reservatório, subindo gradualmente a vazão até atingir aproximadamente 15 l/min. A linha d'água correspondente ao nível de 9 cm pode ser visualizada na Figura 31b.

O tempo de duração do enchimento de 7 cm até 9 cm foi de 03:20 minutos. Após atingir a crista, depois de 20 segundos, a barragem rompeu. A vazão média de enchimento

da etapa II foi de 12,76 l/min (com uma vazão máxima de 14,3 l/min durante 3 min) e o volume injetado foi de 43,4 litros.

Figura 31 - Linha d'água (azul pontilhado) quando chegou na crista da barragem.

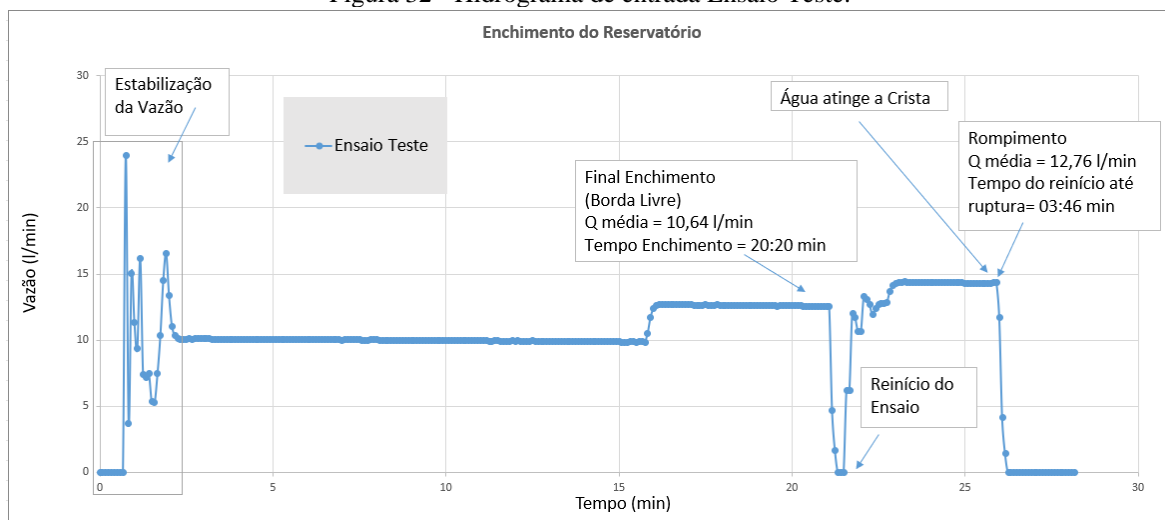


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 32 é apresentado detalhadamente o hidrograma de entrada (vazão ao longo do tempo) deste ensaio. A vazão inicial utilizada na etapa I do enchimento representou um enchimento lento do reservatório buscando entender o comportamento do maciço e para evitar que este sofre-se deformações e/ou a ruptura. Optou-se, então, por subir gradualmente a vazão. Durante o enchimento, e após verificar que o maciço não sofreu deformações, incrementou-se a vazão de 10 l/min para 12,5 l/min.

Na etapa II (que é indicada na Figura 32 como o reinício do ensaio) utilizou-se uma vazão maior, quando comparada com a etapa I, com o objetivo de simular um rápido enchimento do reservatório. A vazão foi subindo gradualmente até estabilizar em 14,33 l/min que foi a vazão no qual a barragem rompeu.

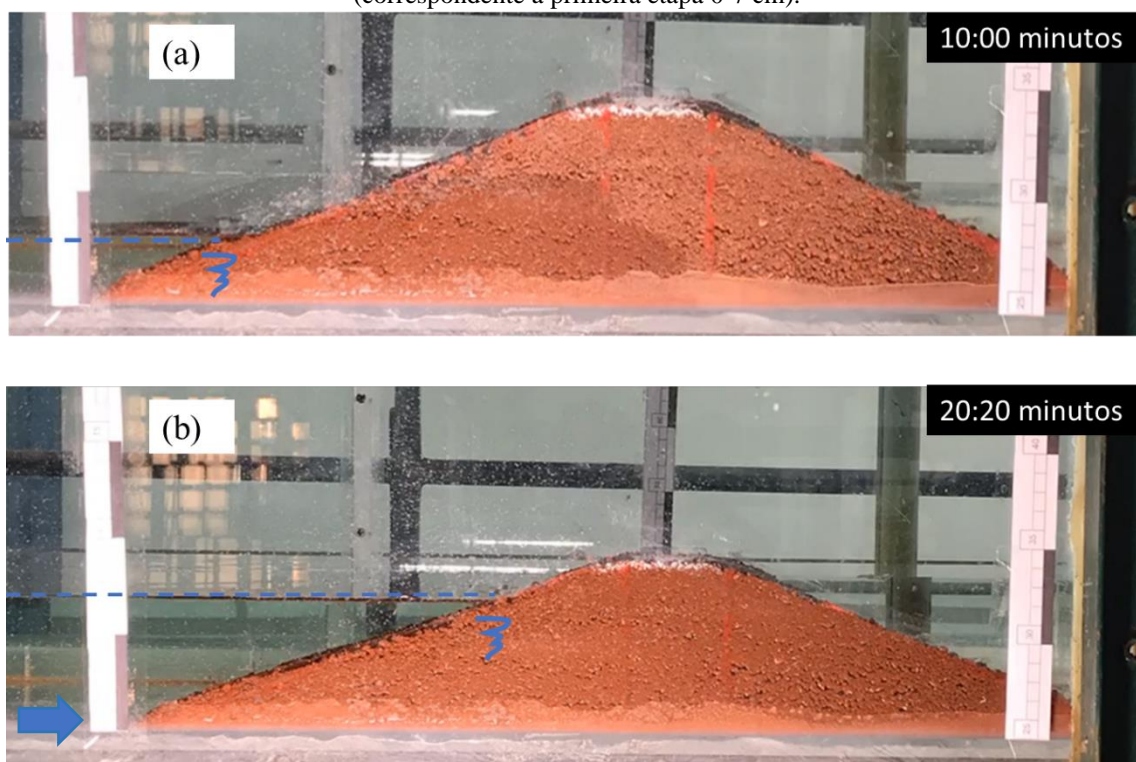
Figura 32 - Hidrograma de entrada Ensaio Teste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 33a é apresentado o resultado da percolação da água no maciço correspondente a metade do tempo de enchimento do reservatório (10:00 minutos) e na Figura 33b o resultado final do enchimento com 20:20 minuto, na qual observa-se a saturação do maciço. Ambas as imagens correspondem a primeira etapa do enchimento, ou seja, até a altura de 7 cm (borda livre).

Figura 33- Resultado da percolação do maciço com 10:00 min e 20:20 min de enchimento do reservatório (correspondente a primeira etapa 0-7 cm).

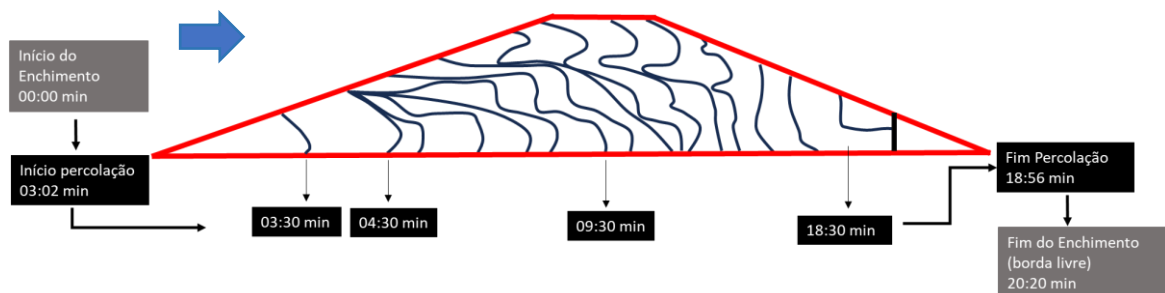


Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o maciço já estava saturado quando atingiu a altura de 7 cm, não houve mudanças visuais observadas nas imagens laterais capturadas correspondente a etapa 2 do enchimento.

Na Figura 34 é possível visualizar as linhas de fluxo a cada 1 minuto e constatar que a percolação iniciou com 03:30 minutos, após o início do enchimento do reservatório, e terminou com 18:56 minutos, ou seja, a água percolou todo maciço antes do completo enchimento do reservatório até a altura de 7 cm (que durou 20:20 minutos).

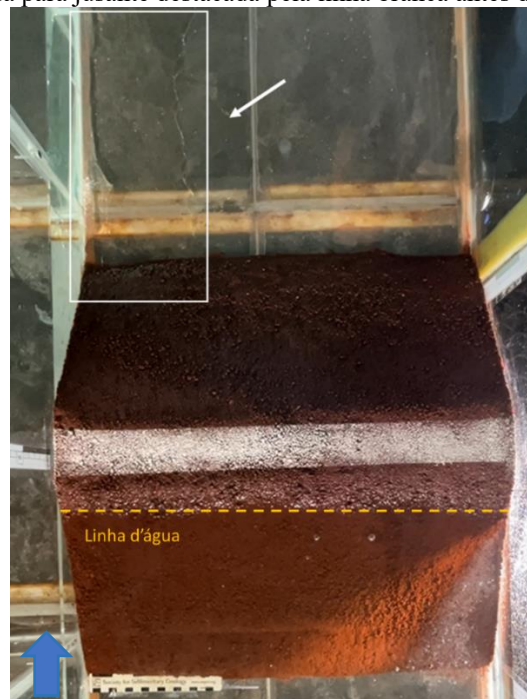
Figura 34 – Resultado da percolação da água no maciço até altura de 7 cm (linhas de fluxo a cada 1 minuto).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos registros fotográficos (Figura 35), percebe-se que a barragem saturou e houve a passagem de água (indicada pela linha branca na figura) para jusante da estrutura antes da linha d'água atingir a crista da barragem.

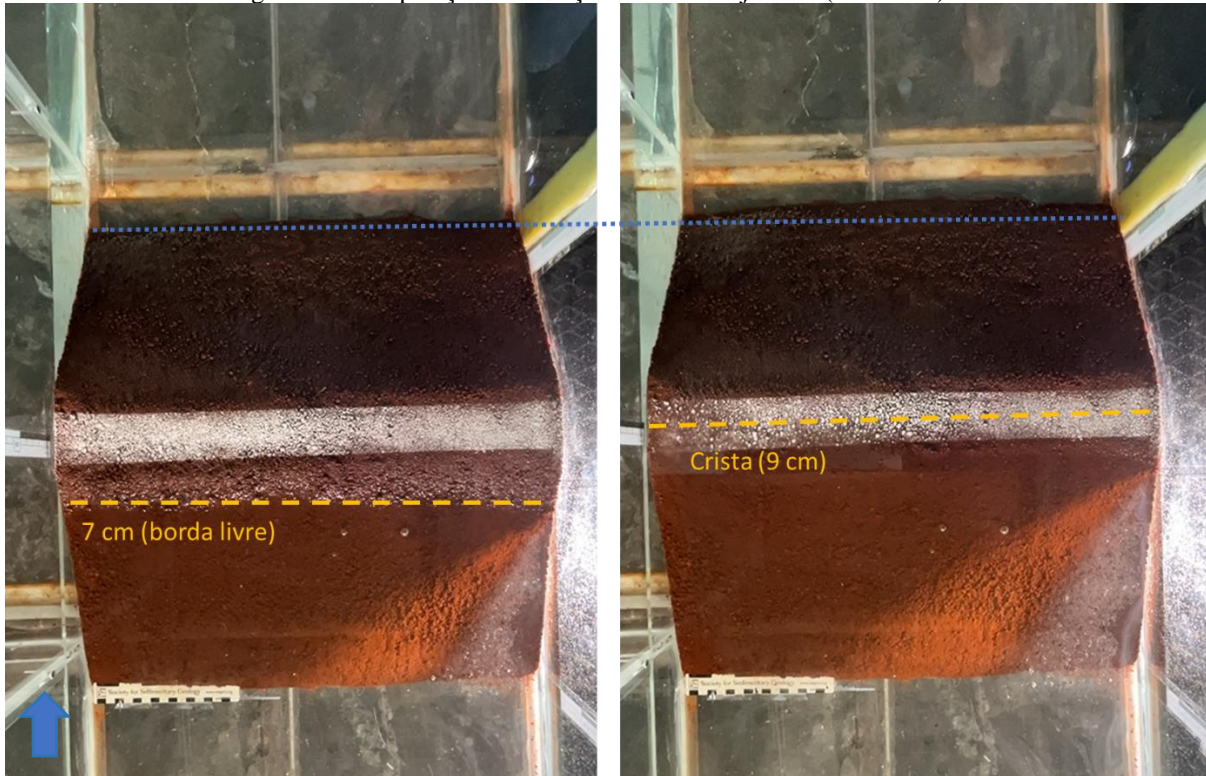
Figura 35 - Passagem de água para jusante destacada pela linha branca antes do nível d'água atingir a crista.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não se observou deformação significativas no maciço durante o enchimento do reservatório na primeira etapa (até 7 cm). Na segunda etapa percebe-se um pequeno avanço do talude de jusante, conforme indicado pela linha azul na Figura 36.

Figura 36- Comparação do avanço do talude de jusante (linha azul).

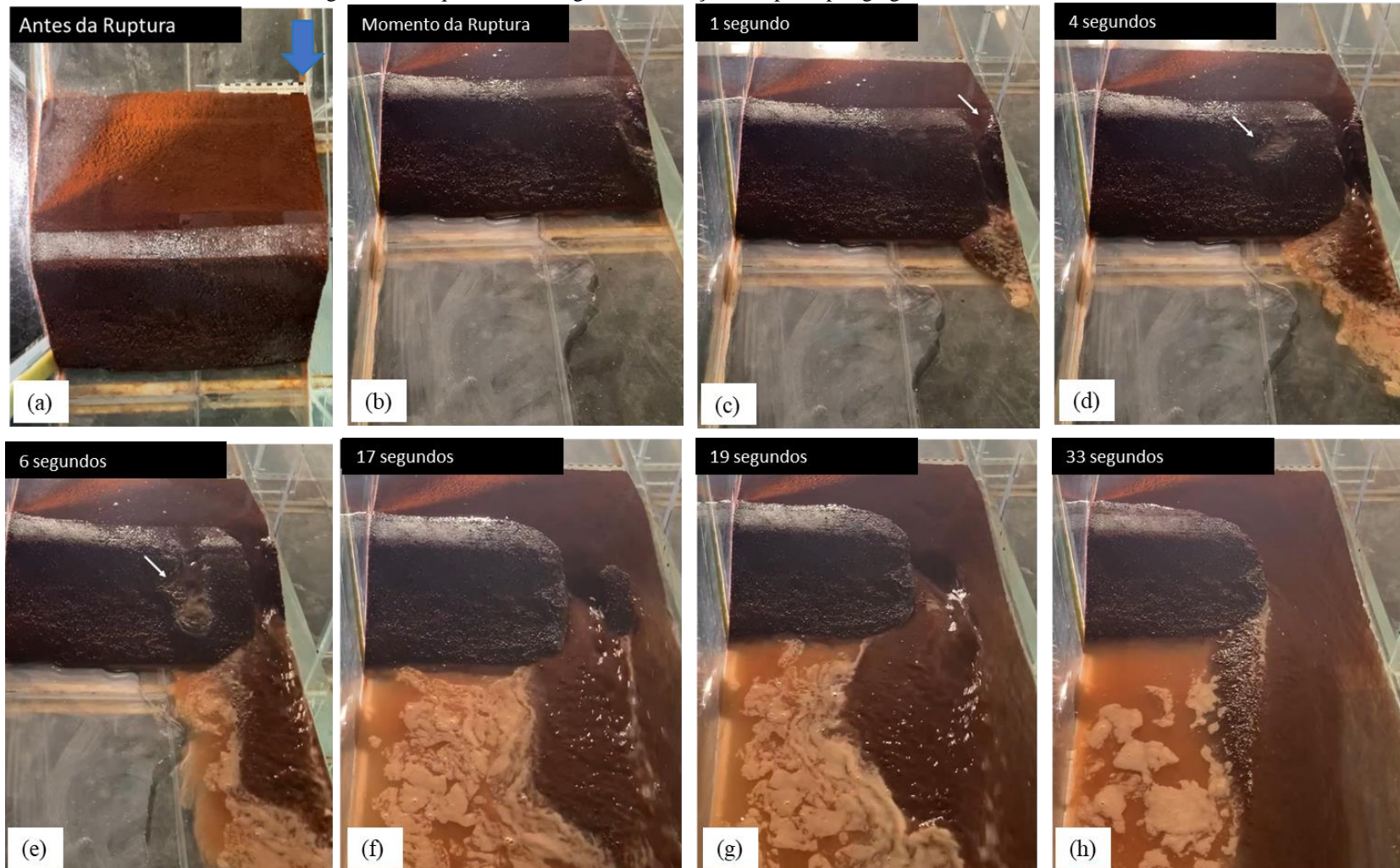


Fonte: Elaborado pelo autor.

O galgamento e a evolução da ruptura ao longo do tempo, podem ser melhores visualizados na Figura 37 a qual apresenta na Figura 37a o maciço antes do galgamento e do seu rompimento. A Figura 37b apresenta o exato momento em que ocorreu a ruptura e sua evolução é apresentada até a Figura 37c. Após 4 s, na Figura 37d, verifica-se um novo ponto de rompimento, conforme indicado pela seta branca na imagem, que separou e criou dois caminhos preferenciais para passagem de água no maciço, conforme evolução apresentada na Figura 37e Figura 37f. Com 19 segundos após o rompimento, identifica-se a evolução da formação da brecha, localizada predominantemente no lado esquerdo do canal e correspondente a aproximadamente 1/3 do maciço, conforme Figura 37g. Após esse ponto, não se verifica mudanças significativas a evolução da brecha, observando-se uma estabilização da mesma, conforme pode em observado na Figura 37h após 33 s do rompimento.

O esvaziamento do reservatório aconteceu com 04:10 minutos e constatou-se que a ruptura ocorreu predominantemente no lado esquerdo pelo fato do canal estar levemente inclinado transversalmente e o galgamento iniciar neste ponto.

Figura 37 - Sequência de imagens da evoluçãoda ruptura por galgamento do barramento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o término do ensaio (Figura 38) e o esvaziamento total do reservatório foi realizado o balanço de massa, para verificar o que ficou retido no maciço da barragem e a quantidade de sedimento que foi carregada pela onda de ruptura.

Figura 38 – Resultado do maciço após a ruptura e esvaziamento completo do reservatório.



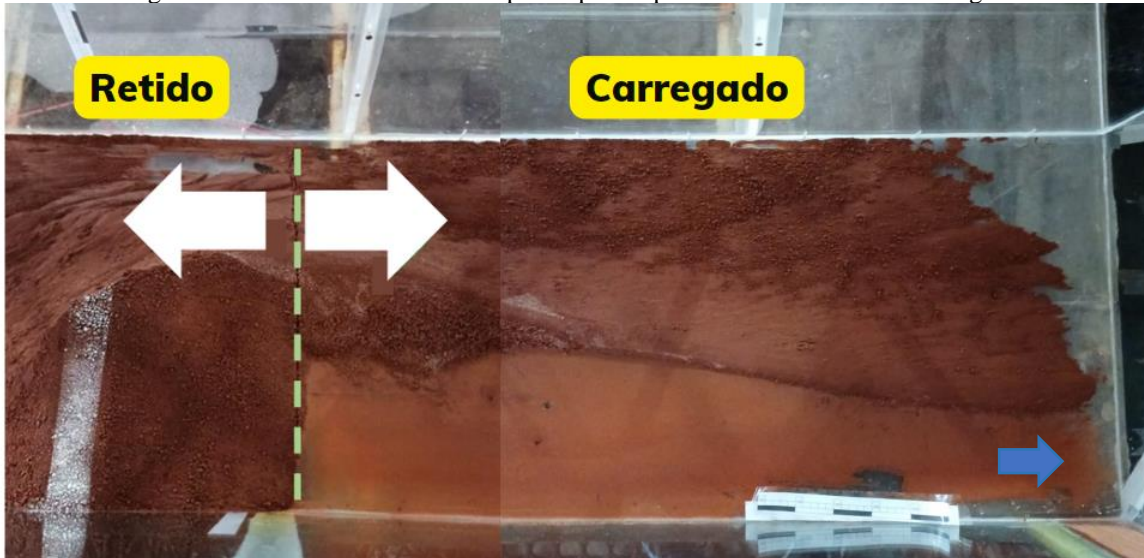
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para isso foi realizada a divisão do material no canal em duas partes (Figura 39), na esquerda foi coletado o solo que ficou retido e na direita o solo que foi carregado pela onda de ruptura. Após a coleta, este material foi disposto em uma estufa para secagem.

Foi possível concluir, após a pesagem do material seco, que 10,11 kg ficaram retidos e 5,8 kg foram carregados pela onda de ruptura.

Pelo fato de a análise do resultado do balanço de massa ter surgido a partir deste ensaio, na construção do maciço não foi realizada a pesagem do material que foi utilizado, porém para os outros ensaios esse parâmetro foi mensurado.

Figura 39 – Divisão realizada no depósito para separar o material retido e carregado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em termos de metodologia desenvolvida e aplicada nesse ensaio inédito, o Ensaio Teste proporcionou visualizar alguns métodos de ensaio que poderiam ser aprimorados nos ensaios subsequentes. Assim os seguintes pontos de atenção e melhoria foram destacados:

- I. Modificar o diâmetro do material utilizado para a construção do maciço, com o objetivo de reduzir a quantidade de grãos maiores “soltos” na superfície da barragem.
- II. Compensar a declividade do canal. Para ajustar a declividade, foi utilizado maior quantidade de material para construção do maciço, buscando compensar o lado que estava mais inclinado (lado direito).
- III. Mensurar a quantidade (peso) do material utilizado para construção da barragem, visando realizar a análise do material que é carregado e retido pela onda de ruptura.
- IV. Instalação de um piezômetro para mensurar o nível de água ao longo do tempo para gerar o hidrograma de ruptura (vazão de ruptura ao longo do tempo), com o objetivo de medir e quantificar a vazão de pico e o tempo de pico da ruptura.

- V. Realizar o enchimento do reservatório rapidamente para evitar que a água percole e sature o talude de jusante (evitando a ruptura antes mesmo do galgamento).

5.2 Ensaio 1

A concepção do Ensaio 1 já partiu da implementação das devidas modificações identificadas e sugeridas a partir do Ensaio Teste. A primeira modificação foi em relação ao diâmetro do material utilizado para construção do maciço. Para este ensaio foi realizado novamente o peneiramento do material, utilizando uma peneira com abertura de 2 mm.

Para o Ensaio 1 o diâmetro máximo do material utilizado para construção do maciço foi de 2 mm. Os resultados referentes a umidade do solo, grau de compactação e densidade do solo podem ser verificadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados referentes a caracterização do solo do Ensaio 1.

Diâmetro Máximo	Umidade (%)		Densidade (kg/m ³)	Grau de Compactação
Até 2 mm	Amostra 1	6,3	1324	Para densidade 1905 kg/m ³ = 69% Para densidade 1869 kg/m ³ = 71%
	Amostra 2	5,4		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que na montagem do maciço, após o segundo peneiramento, que os grãos apresentavam um diâmetro menor e foi verificada uma menor quantidade de grãos “soltos” nos taludes, conforme pode ser analisado na Figura 40.

Figura 40- Granulometria do material na construção do maciço.



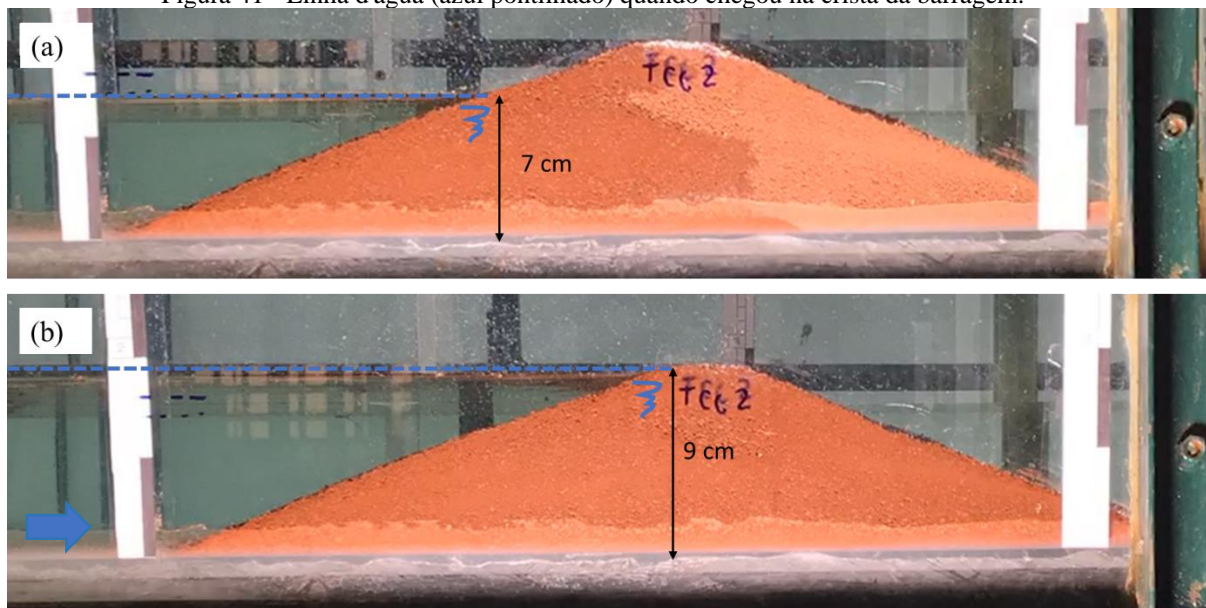
Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste experimento, novamente, o enchimento do reservatório se deu em duas etapas, até o nível máximo considerando a borda livre (etapa I), conforme Figura 41 e, após, até a crista (etapa II) de acordo com Figura 41b.

A etapa I totalizou um volume de 196 litros injetados no reservatório que ocorreu em aproximadamente 12 minutos (11:58 minutos) com uma vazão média de 16,3 l/min (com vazão máxima de 20,2 l/min por 03:40 minutos).

Na etapa II o tempo de enchimento foi de 12:40 minutos com uma vazão média de 5 l/min (vazão máxima de 5,2 l/min durante 12 min) e com volume injetado foi de 62 litros. Foi escolhida a vazão de 5 l/min pelo fato de no Ensaio Teste ter sido utilizada uma vazão de 15 l/min, simulando um enchimento rápido da borda livre até a crista (etapa II do enchimento), no qual a barragem rompeu e então o objetivo no Ensaio 1 foi simular um enchimento lento nesta etapa II e verificar quais seriam os resultados.

Figura 41 - Linha d'água (azul pontilhado) quando chegou na crista da barragem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

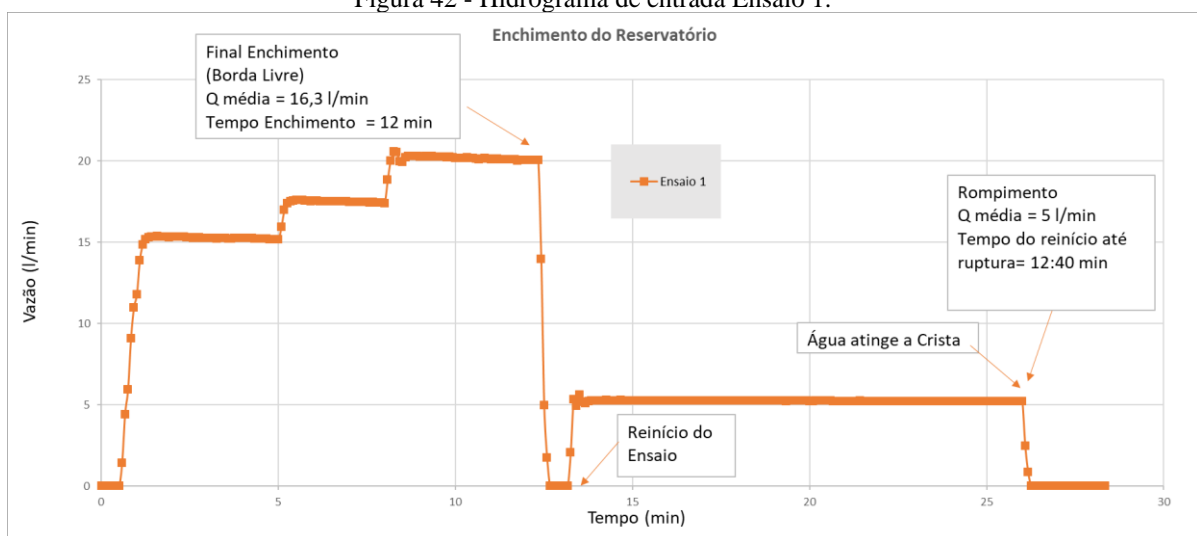
Conclui-se que o tempo de enchimento da etapa II foi superior ao tempo de enchimento da etapa I, sendo que a diferença de nível a ser preenchido na etapa II era de 2 cm e na etapa I de 7 cm.

Na Figura 42 é apresentado o detalhamento do hidrograma de entrada. Observa-se que o enchimento do reservatório na etapa I ocorreu na forma de “degrau” no qual a vazão foi subindo gradualmente até estabilizar em 15 l/min. Após 5 minutos de ensaio foi realizado um incremento de vazão correspondente a 17 l/min e por fim (em aproximadamente 8 minutos) a vazão atingiu e estabilizou no valor de 20 l/min. A vazão média de enchimento

nesta etapa foi de 16,3 l/min (vazão máxima de 20,2 l/min por 03:40 min). Este incremento de vazão ocorreu para que o enchimento do reservatório fosse realizado o mais rápido possível, evitando a saturação do maciço.

Na segunda etapa (que é indicada na Figura 42 como o reinício do ensaio), o enchimento do reservatório ocorreu com uma vazão constante de 5 l/min para verificar se essa vazão causaria a ruptura por galgamento e para simular um lento enchimento do reservatório. Como resultado, a barragem rompeu mesmo com a vazão de 5,2 l/min, correspondente a vazão máxima que durou 12 min.

Figura 42 - Hidrograma de entrada Ensaio 1.

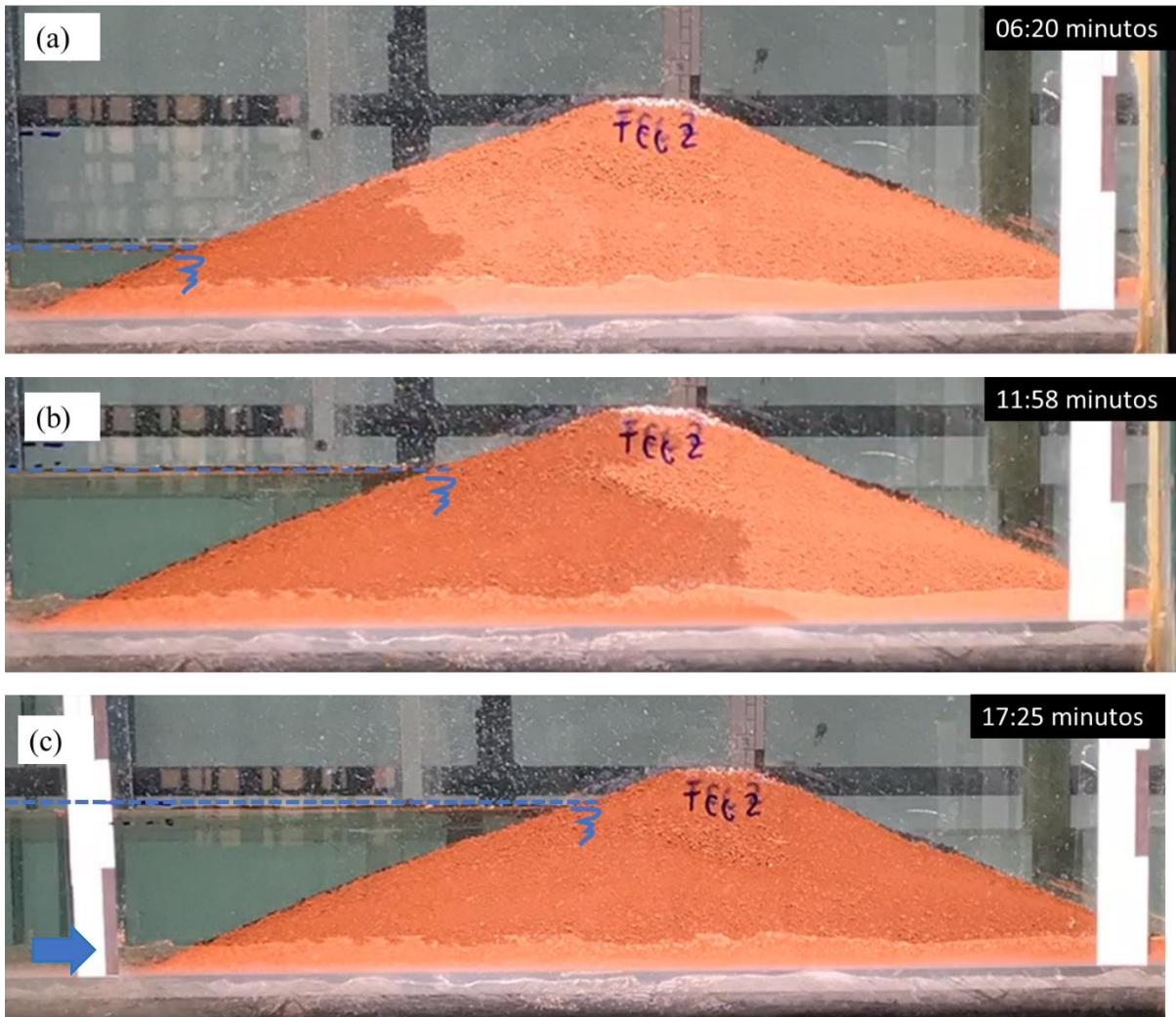


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 43a é apresentado o resultado da percolação da água no maciço correspondente a metade do tempo de enchimento (06:20 minutos) e na Figura 43b o resultado final do enchimento com 11:58 minutos correspondente a etapa I do enchimento, ou seja, até a altura de 7 cm (borda livre). Percebe-se que não ocorreu a percolação completa do maciço (Figura 44), pelo contrário, a percolação atingiu aproximadamente metade do maciço e um dos fatores que pode ter contribuído para esse resultado é o fato de ter sido realizado um enchimento rápido do reservatório nesta etapa I.

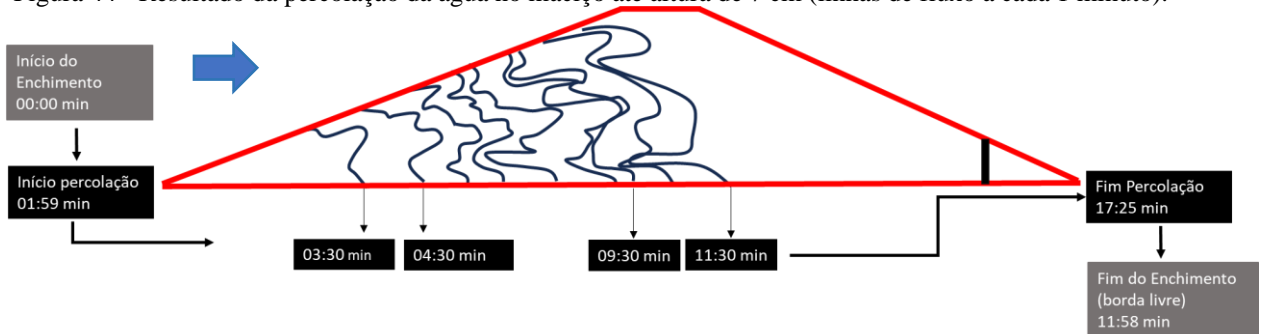
Somente na etapa II do enchimento do reservatório que foi observada a percolação completa do maciço, conforme Figura 43c, que ocorreu com 17:25 minutos e a linha d'água estava aproximadamente na altura de 8 cm.

Figura 43 - Resultado da percolação completa do maciço com 17:25 minutos e com altura aproximada de 8 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

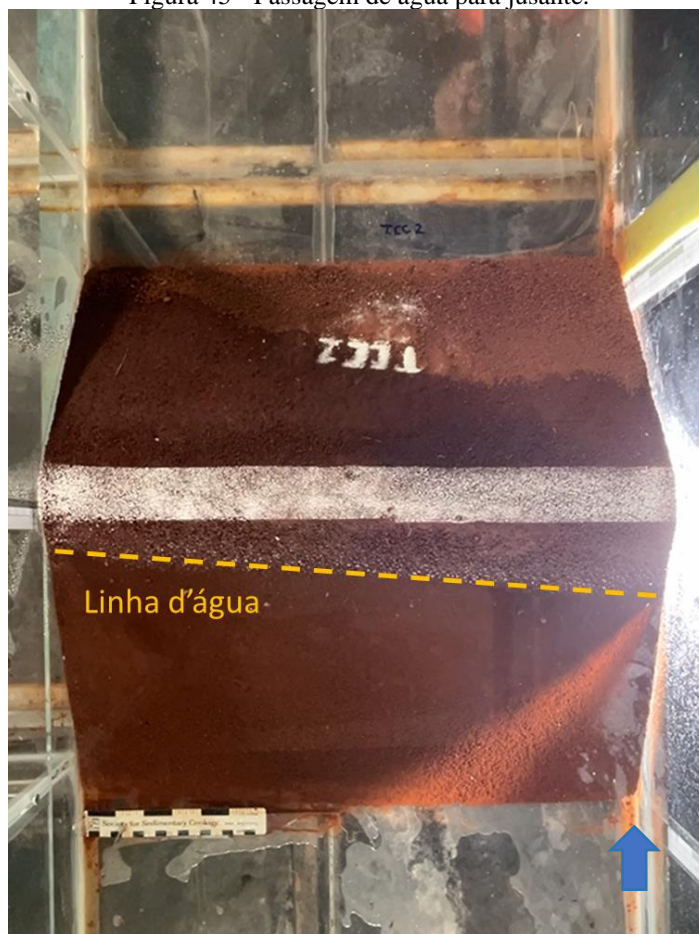
Figura 44 - Resultado da percolação da água no maciço até altura de 7 cm (linhas de fluxo a cada 1 minuto).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não se observou passagem de água para jusante do maciço (Figura 45), através dos registros fotográficos, quando comparado ao mesmo nível de água apresentada na Figura 35 do Ensaio Teste.

Figura 45 - Passagem de água para jusante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

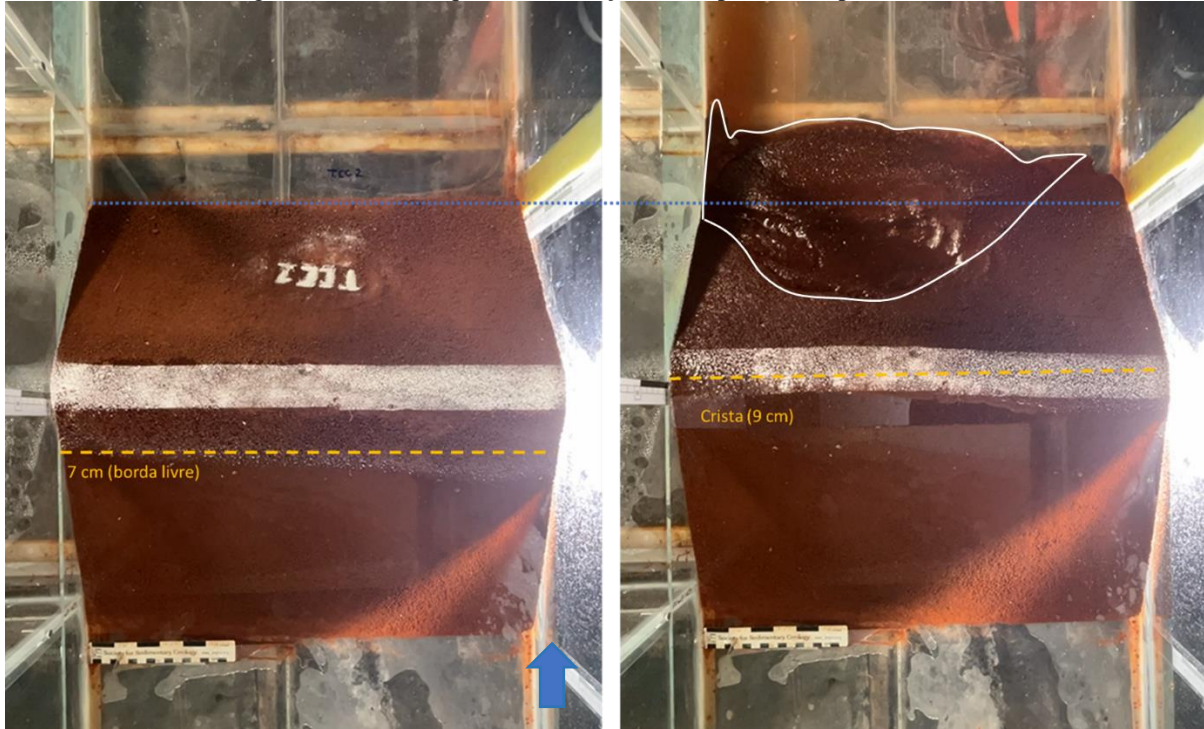
Na Figura 45 percebe-se que a linha d'água não está distribuída de forma uniforme e isto ocorreu pelo fato da tentativa de ser realizada a compensação do canal que estava inclinado.

É possível, através da Figura 46, verificar as deformações que o maciço sofreu. Não se observou deformações significativas durante o enchimento do reservatório corresponde a primeira etapa. Percebe-se que o talude de jusante se encontrava seco.

Na segunda etapa do enchimento, que levou 12:40 minutos, ou seja, 40 segundos a mais que o enchimento correspondente a primeira etapa, nota-se o avanço do talude de jusante (conforme indicado na imagem da direita pela linha branca na Figura 46) e observa-se a liquefação do barramento (que é um modo de ruptura) antes de a barragem sofrer o galgamento. A liquefação ocorre quando o fluxo de água presente no solo exerce uma força que anula o peso e a aderência de suas partículas, que ficam soltas, fazendo com que este material se comporte como um líquido. Ao sofrer liquefação a área afetada perde

completamente a resistência e se torna um ponto de fraqueza na estrutura, podendo romper a partir deste ponto (MELO, 2019).

Figura 46 – Comparação do avanço do talude de jusante (linha azul) e deformação do maciço para o nível de 9 cm (imagem da direita na qual a deformação está representada pela linha branca).

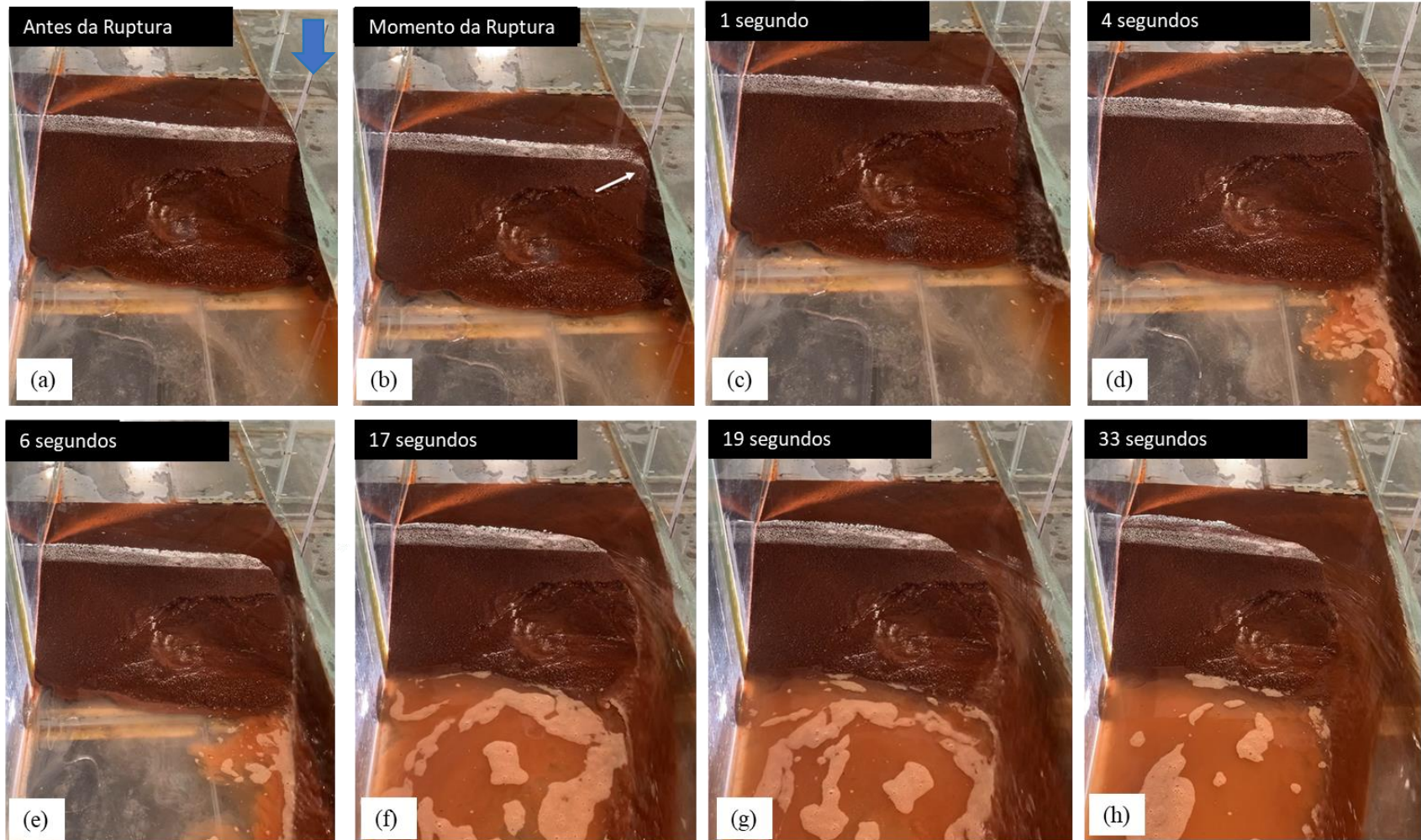


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência de fotos (Figura 47) pode ser observado a evolução da ruptura da barragem ao longo do tempo. Antes da ruptura, na Figura 47a, é possível visualizar as deformações que o maciço sofreu e que impactou na perda da sua estrutura e resistência. O galgamento se iniciou na lateral esquerda do canal, conforme Figura 47b e evoluiu constantemente até alcançar sua largura final, que correspondeu a menos de 1/3 da largura do maciço, conforme Figura 47h.

Observa-se, que após a ruptura total da barragem, a região de jusante que sofreu as maiores deformações antes da ruptura (imagem da direita da Figura 46), não foi alterada (Figura 47h) e isso pode ser justificado pelo fato de a onda de ruptura não ter atingido essa região mais central, pois o material mobilizado no rompimento do maciço criou uma espécie de parede lateral de sedimento que impediu a passagem da água para essa região. A liquefação não agravou a ruptura do maciço (comparando com o Ensaio Teste que obteve um resultado semelhante) e não se visualizou colapso total da estrutura neste ponto.

Figura 47 - Sequência de fotos da ruptura do barramento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O esvaziamento do reservatório ocorreu com 5 minutos e observou-se, novamente, o rompimento predominantemente no lado esquerdo do canal, apesar da tentativa de realizar a compensação da declividade do canal.

Após o término do ensaio (Figura 48) e o esvaziamento total do reservatório foi realizado o balanço de massa, para verificar o que ficou retido e o que foi carregado pela onda de ruptura. Foi utilizada a mesma metodologia do Ensaio Teste (Figura 39) para separação do material e após a secagem constatou-se que 8,75 kg de material ficou retido e 4,64 kg de material foi carregado, sendo que para construção do maciço foram utilizados 15,2 kg de material.

Figura 48 - Resultado do maciço após a ruptura e esvaziamento completo do reservatório.

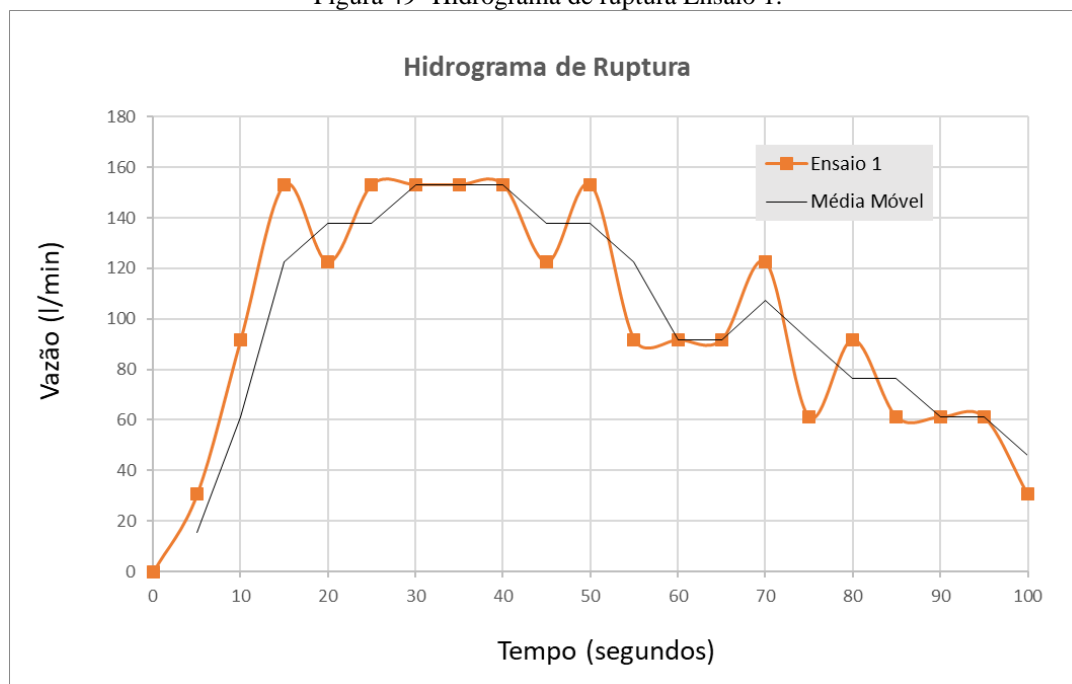


Fonte: Elaborado pelo autor.

O hidrograma de ruptura (que foi uma das melhorias proposta a partir das análises do Ensaio Teste) é apresentado na Figura 49, o qual representa graficamente a variação da vazão efluente no tempo. O piezômetro foi instalado no final do canal e registrou o nível d'água proveniente da onda de ruptura a cada 5 s, no qual realizou a medição de nível em 21 pontos.

De acordo com a média móvel (período = 2 pontos) apresentada no gráfico (linha preta), observa-se que a vazão de pico foi de 153,11 l/min e teve duração de 10 segundos (correspondente ao tempo de pico, que foi alcançado com 30 segundos após o rompimento e se manteve constante até os 40 segundos após o rompimento). O volume total correspondente medido foi de aproximadamente 171 litros.

Figura 49- Hidrograma de ruptura Ensaio 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se na Figura 49 que os 21 pontos analisados não foram suficientes para medir o final do hidrograma, pelo fato de o piezômetro ter sido instalado em um reservatório de com 170 litros, ou seja, quando o reservatório atingiu esse volume medido o fluxo de saída foi direcionado para um reservatório auxiliar no qual não estava preparado para realizar as medições de nível. Para o Ensaio 2 foi realizado os ajustes necessários para realizar a mensuração do hidrograma até a seu total decréscimo final.

5.3 Ensaio 2

Para o Ensaio 2 o diâmetro máximo do material utilizado para construção do maciço foi de 2 mm. Os resultados referentes a umidade do solo, grau de compactação e densidade do solo podem ser verificadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados referentes a caracterização do solo do Ensaio 2.

Diâmetro Máximo	Umidade (%)		Densidade (kg/m ³)	Grau de Compactação
Até 2 mm	Amostra 1	14,3	1243	Para densidade 1905 kg/m ³ = 65%
	Amostra 2	14,7		Para densidade 1869 kg/m ³ = 67%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o diâmetro do solo utilizado para construção do maciço foi o mesmo do Ensaio 1, não se observou mudanças significativas referente a granulometria do material nos taludes (Figura 50).

Figura 50 - Granulometria do material na construção do maciço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença deste ensaio comparado com o Ensaio Teste e o Ensaio 1 é em relação as etapas de enchimento do reservatório. O objetivo era analisar o enchimento rápido do

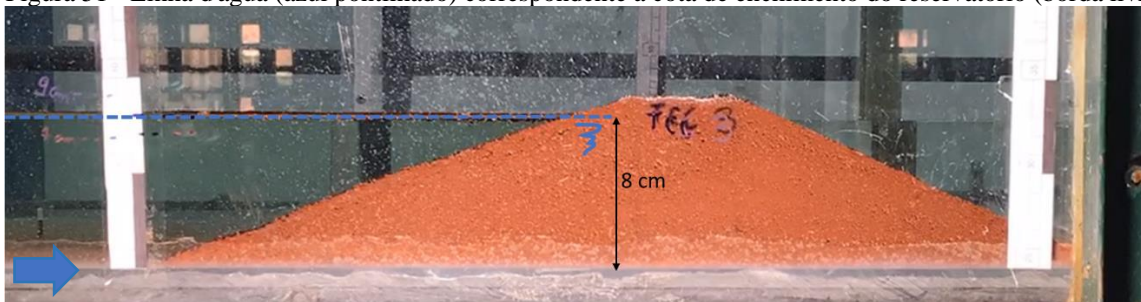
reservatório em etapa única (até a altura de 9 cm) e verificar como isto iria modificar o comportamento da percolação no maciço e consequentemente a ruptura da barragem. Entretanto o enchimento se deu da seguinte forma:

Etapa 1 – enchimento até a altura de 8 cm (Figura 51) causado pelo fato de o maciço não estava uniformemente, a linha d'água não ficou distribuída igualmente no talude de montante, conforme pode ser observado na Figura 52.

Etapa 2 – enchimento da altura de 8 cm até 9 cm (correspondente a crista da barragem).

O enchimento até 8 cm (etapa I) totalizou um volume de 241 litros e ocorreu em 14:17 minutos com uma vazão média de 17 l/min (vazão máxima de 19,5 l/min por 8 min). Optou-se por realizar o ensaio com estas alturas de enchimento para avaliar a influência da percolação e da saturação do maciço no rompimento da barragem.

Figura 51 - Linha d'água (azul pontilhado) correspondente a cota de enchimento do reservatório (borda livre).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 -Linha d'água correspondente à altura de 8 cm (distribuída uniformemente no maciço).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa II (enchimento de 8 cm até 9 cm) foi realizado o enchimento do reservatório subindo gradualmente a vazão até atingir aproximadamente 4,5 l/min, simulando um enchimento lento do reservatório. O tempo de duração desta etapa foi de 05:44 minutos. Após atingir a crista (Figura 53), depois de 30 segundos a barragem rompeu com uma vazão de 5 l/min, correspondente a vazão máxima que durou 5 min) e o volume injetado foi de 24,5 litros.

Figura 53 - Momento em que a linha d'água atinge a crista da barragem.

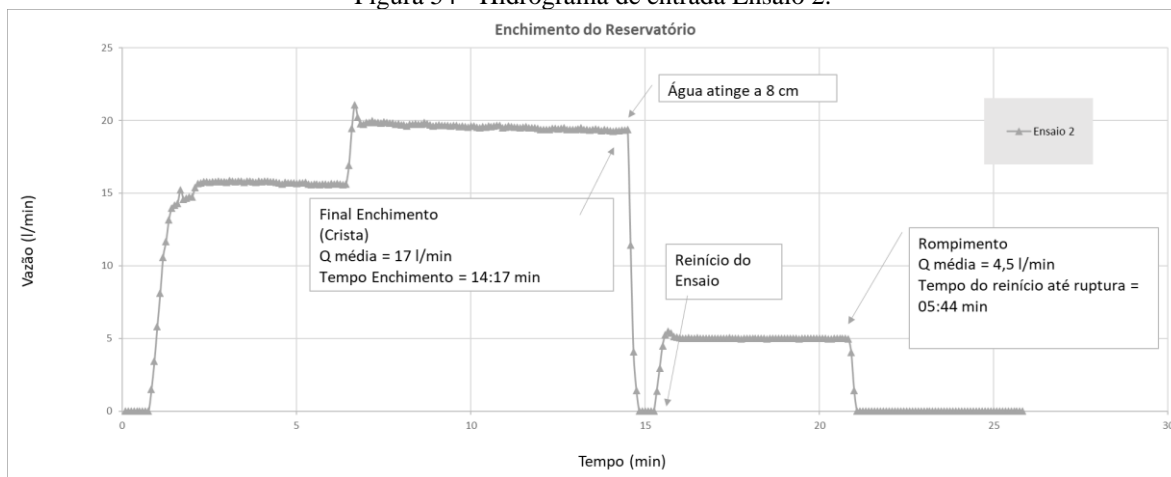


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 54 é apresentado o hidrograma de entrada detalhado. Observa-se que o enchimento na etapa I iniciou de forma gradual, até atingir a vazão de 15,5 l/min e posteriormente observa-se um incremento de vazão até alcançar 20 l/min. O aumento da vazão ocorreu para que fosse realizado o enchimento do reservatório de forma rápida para evitar a saturação do maciço (conforme mesmo procedimento realizado no Ensaio 1).

Quando a lâmina d'água atingiu a altura de 8 cm o ensaio foi pausado e iniciou-se a etapa II do enchimento (indicado na Figura 54 como o reinício do ensaio). A barragem rompeu com a vazão de 5 l/min.

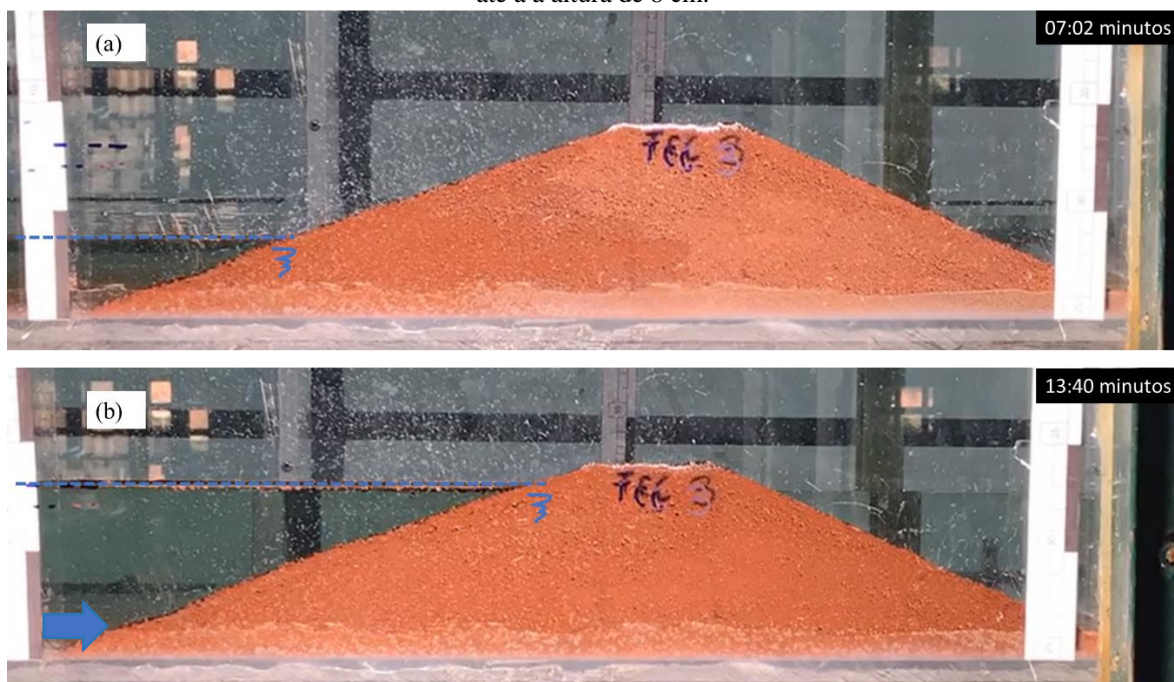
Figura 54 - Hidrograma de entrada Ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 55a é apresentado o resultado da percolação da água do maciço correspondente a metade do tempo de enchimento (07:02 minutos) e na Figura 55b é apresentado o resultado da percolação completa que ocorreu com 13:40 minutos, aproximadamente o mesmo tempo que levou para o enchimento do reservatório até a altura de 8 cm, que foi de 14:17 minutos. Ambas as imagens correspondem a primeira etapa do enchimento, ou seja, até a altura de 8 cm.

Figura 55 – Resultado da percolação do maciço com 07:02 min e 13:40 min de enchimento do reservatório até a a altura de 8 cm.

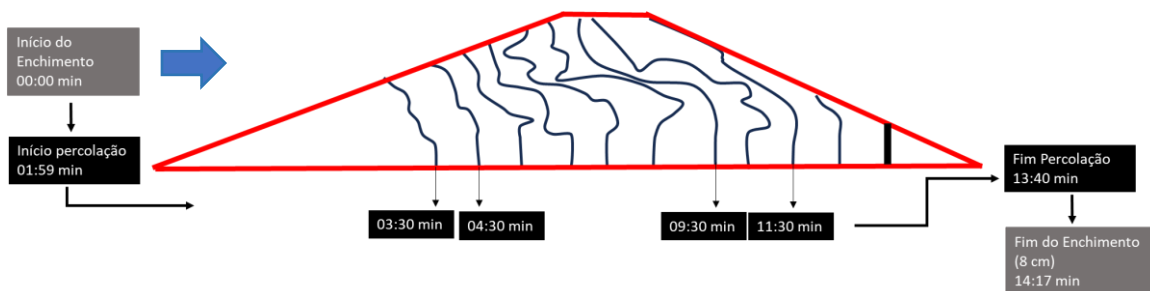


Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o maciço já estava saturado quando atingiu a altura de 8 cm, não houve mudanças visuais observadas nas imagens laterais capturadas correspondente a etapa 2 do enchimento (de 8-9 cm).

Na Figura 56 é possível visualizar as linhas de fluxo a cada 1 minuto e constatar que a percolação iniciou com 01:59 minutos, após o início do enchimento do reservatório, e terminou com 13:40 minutos, ou seja, antes do enchimento completo até a altura de 8 cm.

Figura 56 – Percolação da água no maciço até altura de 8 cm (linhas de fluxo a cada 1 minuto).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos registros fotográficos, percebe-se que a barragem saturou e houve a passagem de água (indicada pela linha branca na figura) para jusante da estrutura quando a linha d'água atingiu a altura de 8 cm, conforme apresentado na Figura 57.

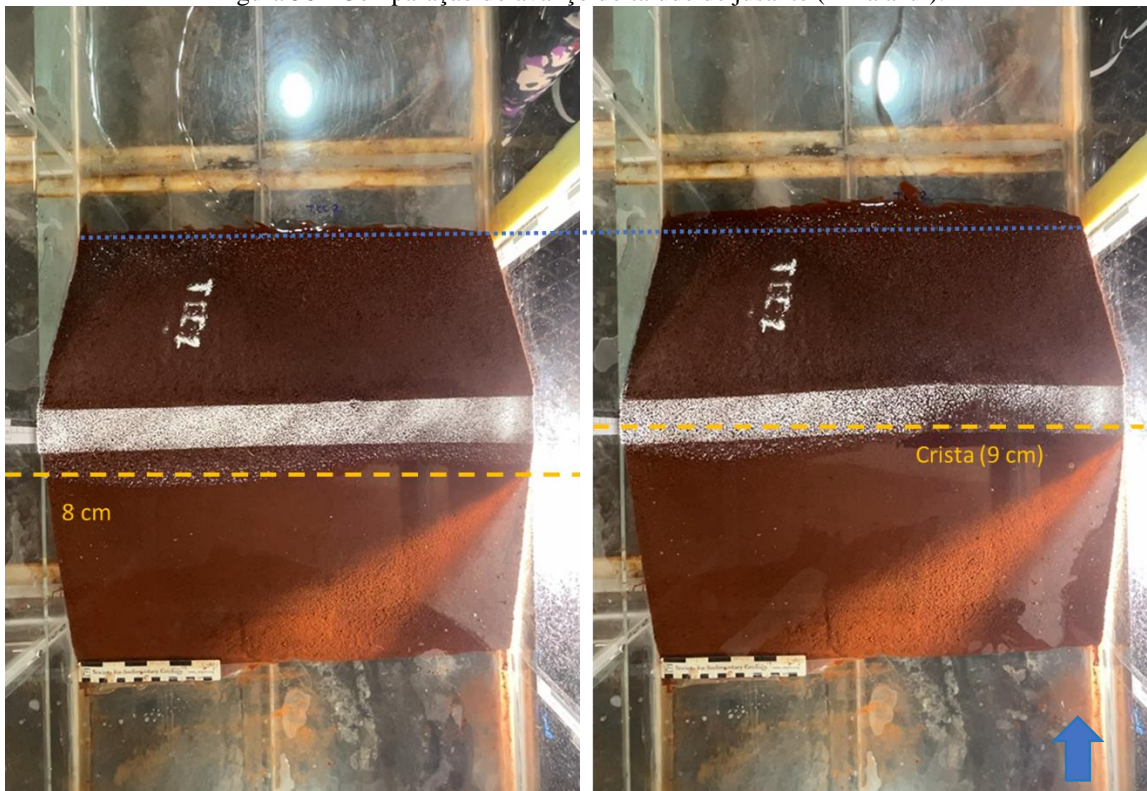
Figura 57 – Passagem de água para jusante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação as deformações do maciço não se observaram deformação significativas no maciço durante o enchimento do reservatório na primeira etapa (até 8 cm). Na segunda etapa percebe-se um pequeno avanço do talude de jusante, conforme indicado pela linha azul na Figura 58. Essa deformação também foi verificada na crista da barragem com um pequeno deslocamento do eixo central.

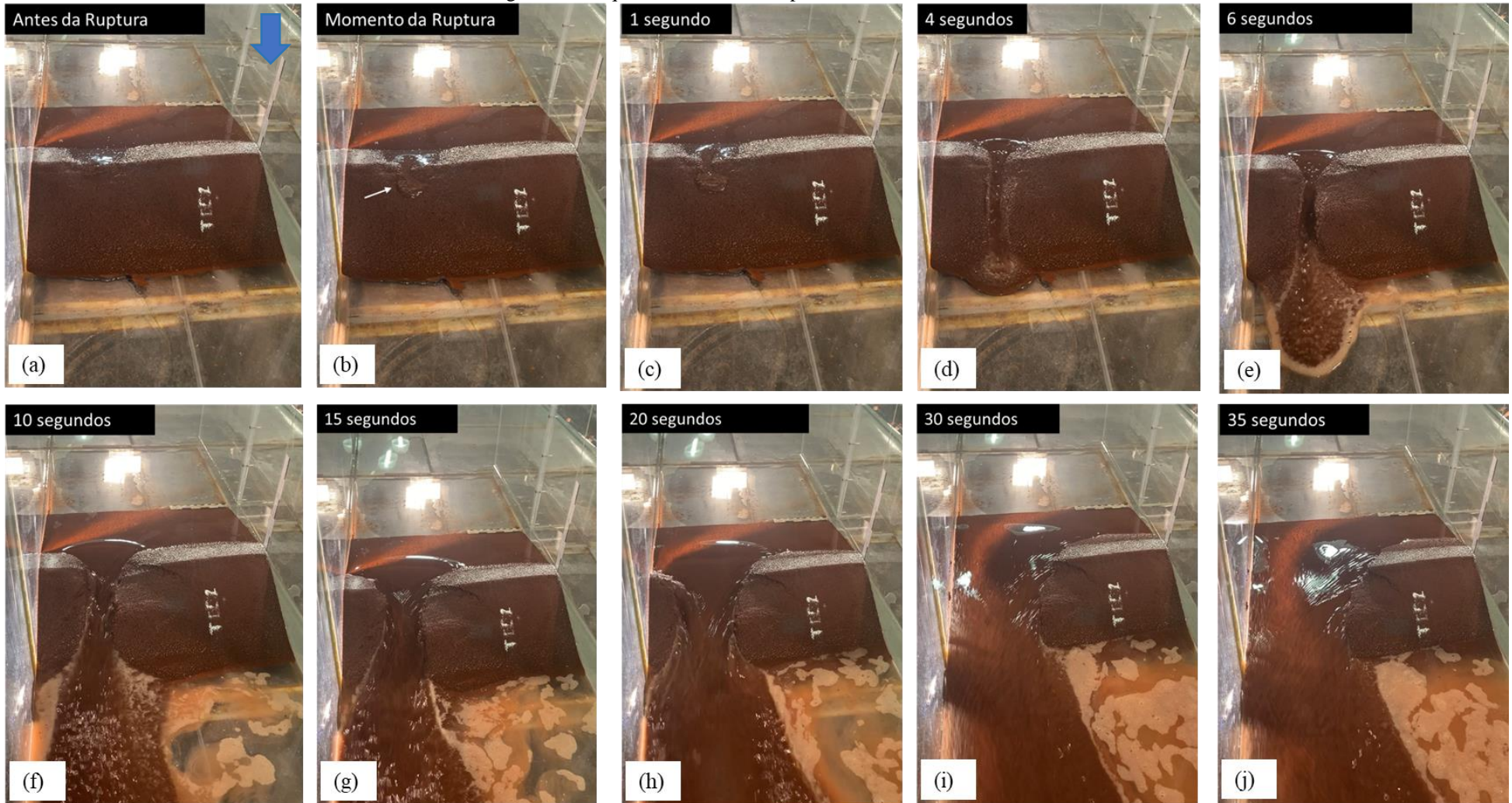
Figura 58 - Comparação do avanço do talude de jusante (linha azul).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 59 é apresentada a evolução da ruptura ao longo do tempo. Diferente dos outros ensaios realizados, observa-se que neste, a ruptura não ocorreu na lateral esquerda do canal, pelo contrário, iniciou-se aproximadamente no meio do maciço, próximo ao lado direito, como apresentado na Figura 59b. A evolução da brecha pode ser observada da Figura 59b até a Figura 59h. Após 30 segundos a brecha atinge a lateral direita do canal erodindo todo o material presente na lateral direita do maciço, como observado na Figura 59j.

Figura 59 - Sequência de fotos da ruptura do barramento.

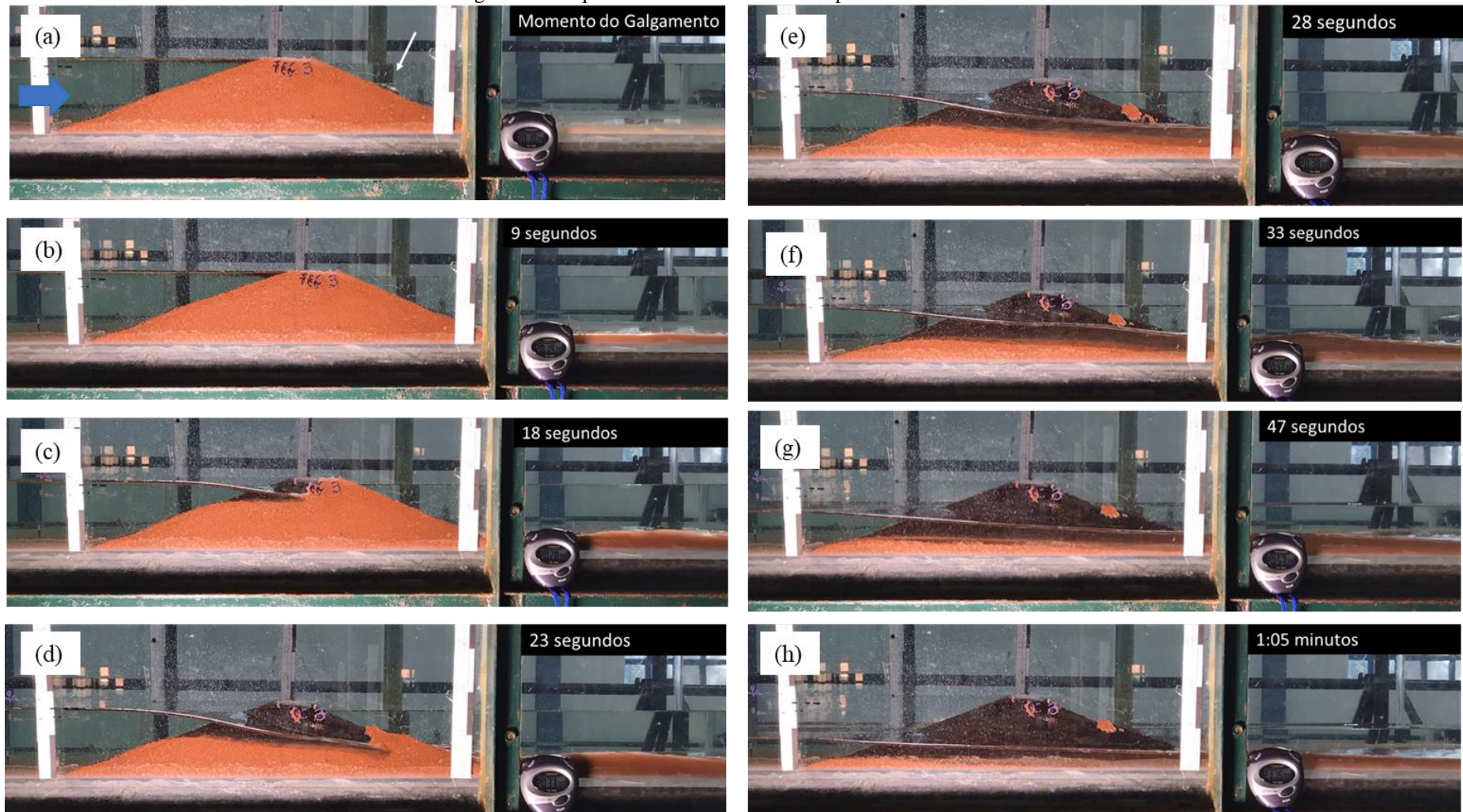


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 60 é apresentada a sequência de imagens correspondente a ruptura, registrada pela câmera que estava instalada do lado direito do canal. Na Figura 60c é possível observar que a ruptura inicia, praticamente, no meio do maciço e o material que está localizado no talude de montante é transportado. Essa erosão do talude ocorre em forma de “degrau”, como pode ser observado na sequência da Figura 60c até Figura 60d. Nota-se nesta sequência a influência da velocidade da água na ruptura do maciço, erodindo e transportando material.

Na Figura 60h observa-se o transporte de material do lado direito do talude e no lado esquerdo parte da estrutura que não teve seu material carregado.

Figura 60 - Sequência de fotos laterais da ruptura do barramento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O esvaziamento completo do reservatório ocorreu com 8 minutos e após o término do ensaio (Figura 61) foi realizado o balanço de massa, para verificar o que ficou retido e o que foi carregado pela onda de ruptura. Foi utilizada a mesma divisão aplicada para o Ensaio Teste (Figura 39) resultando em 8,28 kg de material retido e 6,31 kg de material carregado, sendo que para construção do maciço foram utilizados 15,8 kg de material.

Figura 61 - Resultado do maciço após a ruptura e esvaziamento completo do reservatório.

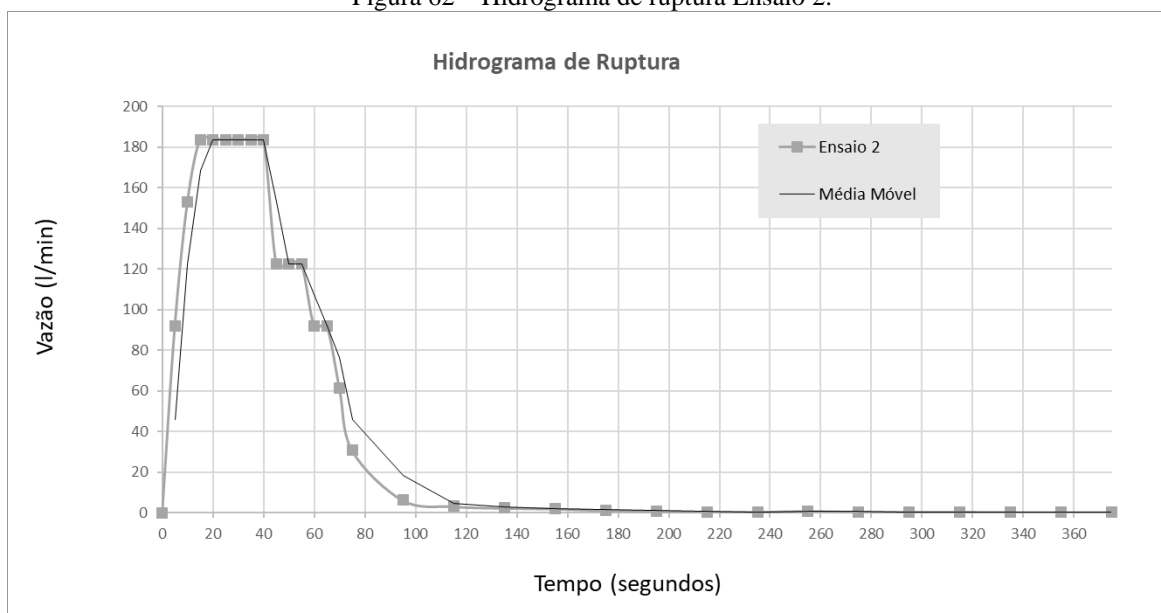


Fonte: Elaborado pelo autor.

O hidrograma de ruptura é apresentado na Figura 62, o qual representa graficamente a variação da vazão efluente no tempo. Neste ensaio foram realizadas 15 medições de nível no reservatório no qual estava instalado o piezômetro (a cada 5 s) e a leitura de 15 pontos em um reservatório auxiliar onde foi instalada uma régua para mensuração do nível a cada 20 s, totalizando 30 pontos medidos.

De acordo com a média móvel (período = 2 pontos) apresentada no gráfico (linha preta), observa-se que a vazão de pico foi de 183,73 l/min e teve duração de 20 segundos (correspondente ao tempo de pico, que foi alcançado com 20 segundos após o rompimento e se manteve constante até 40 segundos após o rompimento). O volume total correspondente medido foi de aproximadamente 172 litros.

Figura 62 – Hidrograma de ruptura Ensaio 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1 Discussão - Comparação dos Resultados

Na Tabela 14 são apresentados os resultados referentes a caracterização do solo para cada ensaio realizado e na Tabela 15 um resumo de todos os parâmetros analisados para as diferentes simulações realizadas.

O objetivo desde item é buscar compreender a correlação entre os resultados dos três ensaios realizado já que eles apresentaram vazões de enchimento diferente entre as etapas (etapa I e etapa II de enchimento) e entre os ensaios.

Tabela 14 - Resultados dos parâmetros que caracterizam o solo utilizado para cada ensaio.

Ensaio	Diâmetro máximo (mm)	Umidade (%)			Densidade do Solo (kg/m ³)	Grau de compactação (%)	
		Amostra 1	Amostra 2	Média		densidade 1905 kg/m ³	densidade 1869 kg/m ³
Teste	4	14	8	11	1119	63	64
1	2	6,3	5,4	5,9	1324	69	71
2	2	14,3	14,7	14,5	1243	65	67

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Resumo de todos os ensaios realizados.

Etapa		Parâmetro	Ensaio Teste	Ensaio 1	Etapa	Ensaio 2
Enchimento	I (0-7 cm)	Q média de enchimento (l/min)	10,64	16,3	I (0-8 cm)	17
		Tempo de enchimento (min)	0:20:20	0:11:58		0:14:17
		Volume injetado (litros)	215	196		241
		Percolação no maciço	completa	metade		completa
	II (7-9 cm)	Q média de enchimento (l/min)	12,76	5	II (8-9 cm)	4,5
		Tempo de enchimento (min)	0:03:20	0:12:40		0:05:44
		Volume injetado (litros)	43,4	62		24,5
		Percolação no maciço	completa	completa		completa
	9 cm - rompimento	Vazão de rompimento (m ³ /s)	14,33	5,2	9 cm - rompimento	5
		Tempo de rompimento após galgamento (min)	0:00:20	0:00:22		0:00:30
		Esvaziamento reservatório (min)	0:04:10	0:05:00		0:08:00
		Volume total injetado (m ³)	258,4	258		265,5
Percolação	Tempo percolação completa (min)	0:18:56	0:17:25	Percolação	0:13:40	
Hidrograma Ruptura	Q de pico (l/min)	-	153,11	Hidrograma Ruptura	183,73	
	Tempo que atingiu o pico da vazão (s)	-	30		20	
	Duração do tempo de pico (s)	-	20		20	
	Volume (l)	-	171		172	
Balanço de Massa	Material utilizado (kg)	-	15,2	Balanço de Massa	15,8	
	Material retido (kg)	10,11	8,75		8,28	
	Material carregado (kg)	5,8	4,64		6,31	
	Retido + carregado (kg)	15,91	13,39		14,59	
	Dif. (Material utilizado - (retido + carregado))	-	1,81		1,18	
	Distância do material carregado (cm)	111	111		111	
Brecha de Ruptura	Origem	Lateral esquerda	Lateral esquerda	Brecha de Ruptura	centro p/ lateral direita	
	Tamanho final (cm)	23	15		27	
	Tempo de formação da brecha (s) - Tp	00:23	00:33		00:33	

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Caracterização do Solo

Em relação a caracterização do solo utilizado para construção do maciço, o Ensaio 2 foi o que apresentou o solo mais úmido e o Ensaio 1 o solo mais seco (considerando a média dos valores), sendo que o Ensaio Teste foi o que melhor se aproximou da faixa dos valores considerados para umidade ótima que é de 11,7% e 12,4%. O menor grau de compactação foi observado no Ensaio Teste (para ambas as densidades consideradas) no qual apresentou o maior diâmetro máximo do grão (4 mm). O Ensaio 1 apresentou o maior grau de compactação.

Quanto maior a densidade do solo maior será sua compactação e menor sua porosidade, o que corrobora com os resultados apresentados na Tabela 14 (referente a densidade e o grau de compactação).

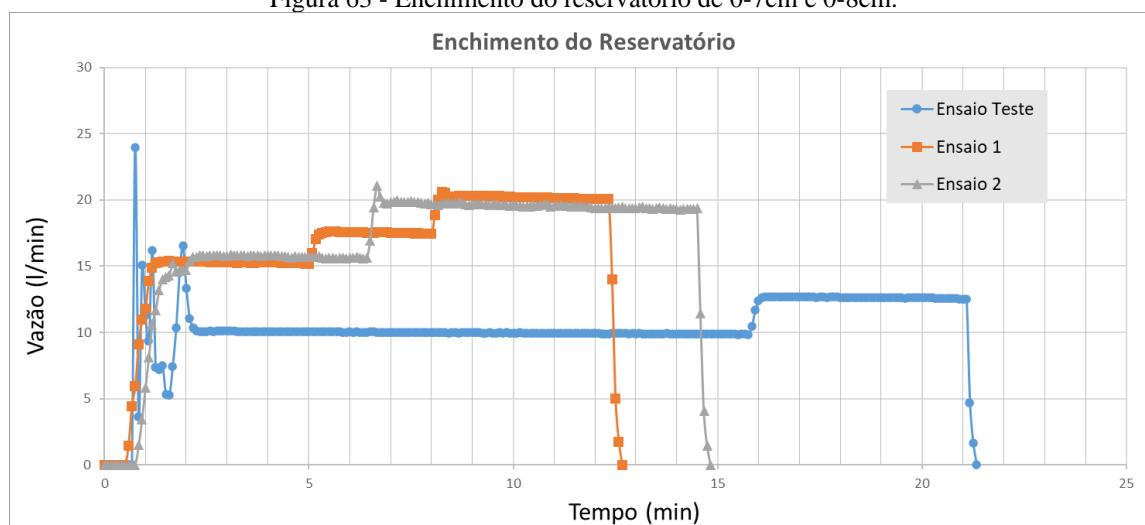
- Etapa I de enchimento (0-7 cm e 0-8 cm)

Observa-se na Tabela 15 que a menor vazão média de enchimento foi a do Ensaio Teste, correspondente a 10,64 l/min, caracterizando um enchimento lento. No Ensaio 1 e Ensaio 2 a vazão média de enchimento foi respectivamente de 16,3 l/min e 17 l/min, caracterizando um enchimento rápido.

O maior tempo de enchimento nesta etapa foi observado no Ensaio Teste, seguido pelo Ensaio 2 e Ensaio 1, respectivamente, sendo que a altura (nível de enchimento) a ser alcançada no Ensaio 2 era de 8 cm (porém com uma menor vazão).

Na Figura 63 pode ser observado o comportamento da vazão ao longo do tempo.

Figura 63 - Enchimento do reservatório de 0-7cm e 0-8cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação as vazões máximas, observa-se que no Ensaio 1 a vazão máxima foi de 20,2 l/min e teve duração de 03:40 min, enquanto o Ensaio 2 apresentou uma vazão máxima de 19,5 l/min com uma duração de 8 minutos.

Em relação aos volumes injetados (Tabela 15), comparando o Ensaio Teste (215 litros) e o Ensaio 1 (196 litros), acredita-se que essa diferença ocorreu devido ao grau de compactação e umidade do solo (maior grau de compactação e menor umidade no Ensaio 1).

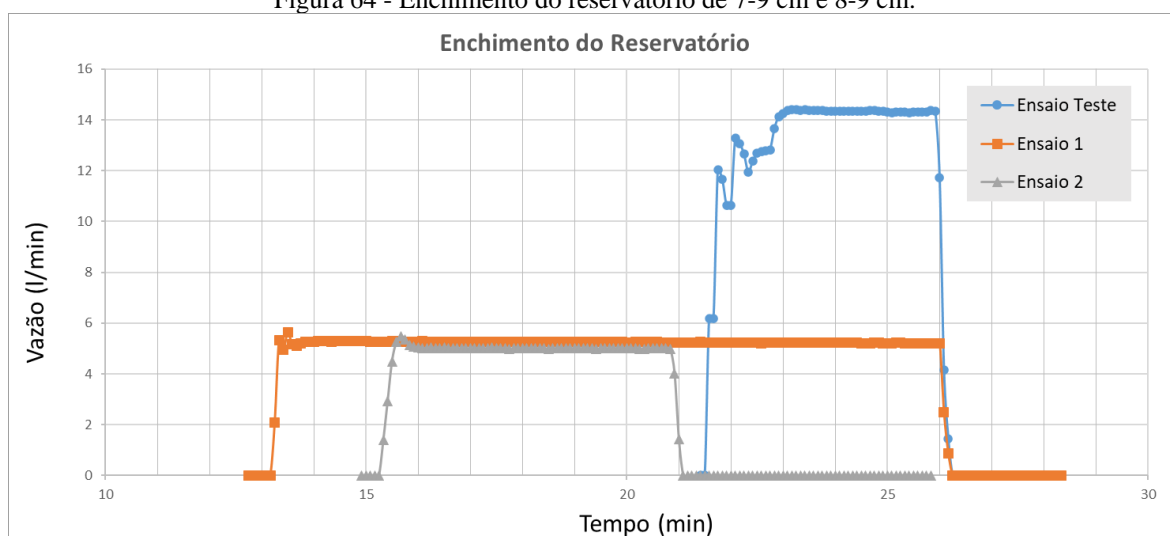
- Etapa II do Enchimento (7-9 cm e 8-9 cm)

Conforme apresentado na Tabela 15, para estes intervalos, observa-se que a vazão de enchimento foi maior para o Ensaio Teste (12,76) e menor para o Ensaio 1 (5 l/min) e Ensaio 2 (4,5 l/min), conforme pode ser verificado na Figura 64.

Entre o Ensaio 1 e o Ensaio 2 (enchimento lento), observa-se uma significativa diferença no tempo de enchimento, sendo que o Ensaio 1 levou praticamente o dobro do tempo para realizar o enchimento até a crista (12:40 minutos) comparado com os 05:44 minutos do Ensaio 2 que possuía uma vazão menor de enchimento. Vale lembrar que o Ensaio 2 teve o seu enchimento da altura de 8 cm para 9 cm.

No Ensaio 1 foi constatada a saturação e deformação do maciço (conforme Figura 46), impactando na passagem de água para jusante da estrutura, que pode ter contribuído para a diferença do volume injetado entre o Ensaio Teste (43,4 l/min) e o Ensaio 1 (62 l/min). Essa comparação foi realizada devido ao nível de enchimento ser o mesmo para estes ensaios.

Figura 64 - Enchimento do reservatório de 7-9 cm e 8-9 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Rompimento por Galgamento: Enchimento 9 cm-rompimento e 8 cm-rompimento.

De acordo com a Tabela 15, conclui-se que o tempo após a linha d'água atingir a crista da barragem e o maciço romper, foi semelhante para os três ensaios realizados, porém observa-se que o Ensaio 2 apresenta um tempo maior para este intervalo (30 segundos).

Sobre o esvaziamento do reservatório, ressalta-se que a diferença observada no Ensaio 2 foi devido ao fato deste ter sido medido de forma fidedigna, no qual esperou-se toda água sair do reservatório após o término completo do ensaio. No Ensaio Teste e no Ensaio 1 este tempo foi contabilizado no final do ensaio (esvaziamento quase que completo), quando todos os equipamentos de medição foram desligados. O volume total injetado foi semelhante para todos os ensaios. A maior vazão de rompimento foi observada no Ensaio Teste (14,3 l/min), seguida do Ensaio 1 (5 l/m).

- Percolação

Em relação a percolação o Ensaio 2 foi o que apresentou a percolação completa do maciço mais rápido (com 13:40 minutos). Uma das possibilidades para isto ocorrer é que a umidade do solo para o Ensaio 2 foi a maior que a umidade medida para os outros ensaios (conforme Tabela 14).

- Hidrograma de Ruptura

De acordo com a Tabela 14 percebe-se que no Ensaio 1 o tempo que levou para atingir a vazão de pico foi de aproximadamente 30 s e a vazão de pico foi de 153,11 l/min. No Ensaio 2 o tempo necessário para atingir a vazão de pico foi de 20 segundos (10 segundos a menos comparado ao Ensaio 1) e a vazão de pico foi superior (183,73 l/min). A duração do tempo referente a vazão de pico foi igual para os dois ensaios (20 segundos). Estes resultados consideram a média móvel (período = 2) dos hidrogramas de ruptura (Figura 54 e Figura 67).

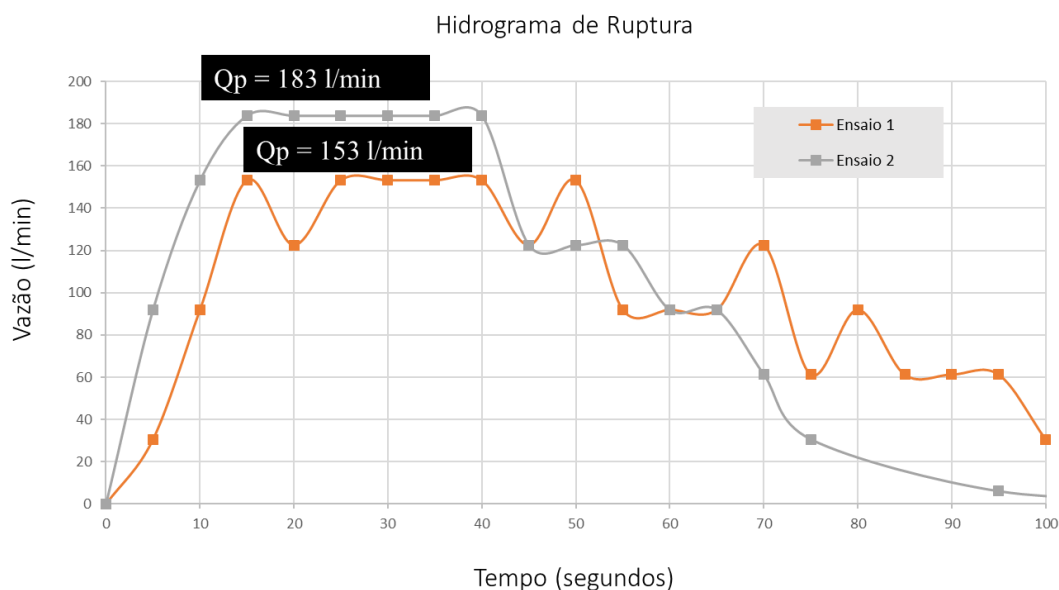
Na Figura 65 é apresentado o hidrograma de ruptura para o Ensaio 1 e Ensaio 2 para o tempo de 100 segundos (ressalta-se que os valores apresentados no Tabela 15 para o hidrograma de ruptura são referentes a média móvel considerando 100 segundos).

Observa-se que o Ensaio 1 (Figura 65) apresentou um hidrograma de ruptura com uma distribuição menos homogênea ao longo do tempo, no qual ainda se observou picos de vazão em 50,70 e 80 segundos após a ruptura, diferente do hidrograma de ruptura do

Ensaio 2 em que teve a maior vazão medida no começo e depois foi decrescendo constantemente.

No Ensaio 2 observa-se um esvaziamento rápido do reservatório, principalmente no começo. No Ensaio 1, observa-se, uma vazão mais constante ao longo do tempo, visto que em 100 segundos ainda se verifica uma vazão de 20 l/min, sendo que no Ensaio 2 neste mesmo ponto a vazão está próxima de zero.

Figura 65 – hidrograma de ruptura para o Ensaio 1 e Ensaio 2 para o tempo de 100 segundos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 16 é apresentado os valores referentes a vazão de pico calculada a partir das equações matemáticas que foram apresentadas no item 3.6 Hidrograma de Ruptura. Observa-se que a equação de Pierce é a que mais se aproxima do hidrograma de ruptura medido, seguida pela equação do vertedor de soleira espessa (que está na mesma ordem de grandeza).

Tabela 16 – Resultado da vazão de pico a partir das Fórmulas matemáticas.

Equações	Q_p Ensaio Teste (l/min)	Q_p Ensaio 1 (l/min)	Q_p Ensaio 2 (l/min)
Lou (1981)	4648,69	4648,695	4648,695
Hagen	11878,24	11878,24	12053,63
Saint - Venant	72,16	72,16	72,16
Schoklistch	32,97	40,82	30,43
Bureau of Reclamation	13251,15	13251,15	13251,15
Vertedor de Soleira Espessa	633,42	413,1	743,58

Equações	Q_p Ensaio Teste (l/min)	Q_p Ensaio 1 (l/min)	Q_p Ensaio 2 (l/min)
Wetmore e Fread	7038,00	4590	8262
Froelich	1233,19	1233,186	1244,345
Pierce	98,17	98,17112	100,0047

Fonte: Galeano, 2016 e Faria, 2019.

Os valores utilizados referentes aos parâmetros das equações apresentada na Tabela 16 podem ser visualizados no ANEXO D.

- Balanço de Massa

No Ensaio 1 foram utilizados 15,2 kg de material para construção do maciço, sendo que 58% ficou retido na estrutura e 31% foi transportado. No Ensaio 2 observa-se que 53% do material ficou retido e 40% foi carregado, o que corrobora com o hidrograma de ruptura, no qual foi observada uma maior vazão no Ensaio 2 que contribuiu para o transporte de sedimento.

A diferença ente o material utilizado para construção do maciço e o material coletado após o ensaio foi de 1,81 kg para o Ensaio 1 e 1,18 kg para o Ensaio 2 e essa diferença pode estar associado a umidade do solo, visto que os pesos após a coleta foram realizados no solo após sua secagem na estufa a 100°.

- Abertura da Brecha

Em relação a origem da brecha, observa-se na Tabela 15 e na Figura 66 que no Ensaio Teste e no Ensaio 1, ocorreu predominantemente no lado esquerdo do canal, pelo fato deste estar levemente inclinado transversalmente. Essa inclinação foi identificada no Ensaio Teste e no Ensaio 1 já foi realizada (havendo a tentativa) sua correção, porém ainda se observou a ruptura neste mesmo ponto. O fato da liquefação e da deformação no Ensaio 1 ter ocorrido na lateral esquerda, onde se iniciou a brecha, pode ter contribuído para o rompimento se iniciar no lado esquerdo, visto que houve movimentação do talude de jusante e deformação da estrutura, fazendo com que essa tivesse um rebaixamento nesta posição.

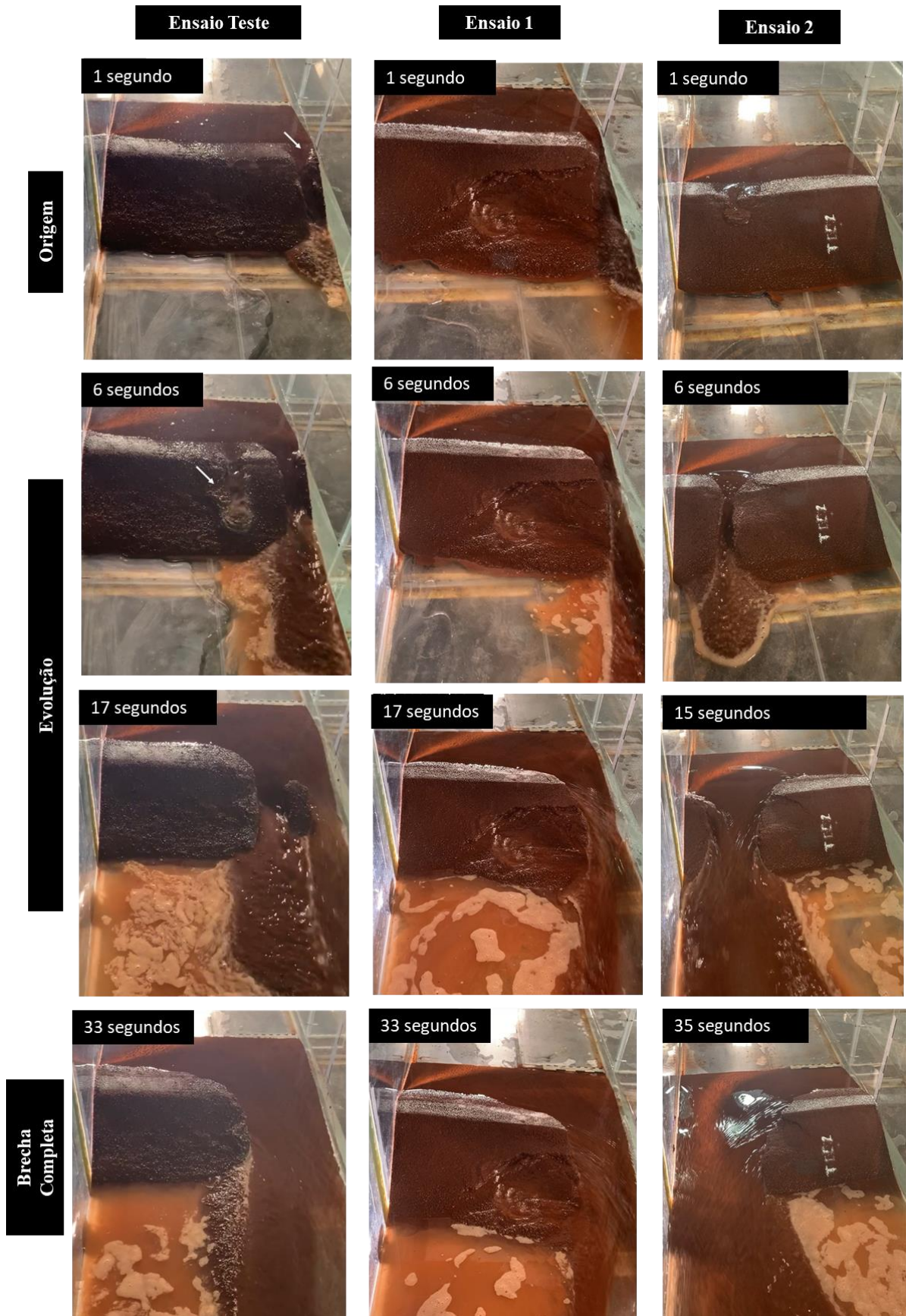
No Ensaio 2 a origem da brecha iniciou-se na parte central-direita do maciço e nessa situação houve a compensação da declividade, na qual pode ter influenciado para a linha d'água não ter sido distribuída uniformemente no talude de montante.

Em relação a deformação, no talude de jusante do Ensaio 1 foi onde se identificou a maior deformação da estrutura, que apresentou ruptura por liquefação antes do galgamento.

Não se observou que esse ponto de fragilidade contribui para um pior cenário de rompimento, pois após o galgamento ainda é possível identificar essas deformações no talude de jusante, então constata-se que essa deformação afetou a parte mais superficial do talude e não sua estrutura interna.

A evolução da brecha do Ensaio Teste iniciou no lado esquerdo do canal (junto a parede) e depois foi observado outro ponto de rompimento mais na parte central-esquerda do maciço, que criou dois caminhos preferenciais para passagem da água. No Ensaio 1 a evolução da brecha permaneceu na lateral esquerda do canal e no Ensaio 2 observa-se a evolução do centro para a lateral direita do canal.

Figura 66 - Abertura da brecha para os três ensaios realizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como resultado (Figura 67) em todos os ensaios se observa que a evolução da brecha sofreu significativas modificações até aproximadamente os 30 segundos após o galgamento (conforme Figura 66), depois deste tempo foi identificada pequenas mudanças e o esvaziamento completo do reservatório. As imagens da Figura 67 não estão na mesma escala entre si, então visualmente os valores correspondentes a abertura da brecha podem parecer semelhantes para o Ensaio Teste e o Ensaio 2, porém eles não são. O Ensaio 1 foi o que apresentou a menor abertura de brecha com 15 cm, seguido do Ensaio Teste (23 cm) e do Ensaio 2 (27 cm) que apresentou a maior abertura.

O fato de a abertura da brecha ser maior no Ensaio 2 corrobora com os resultados referentes ao hidrograma de ruptura, em que para esse ensaio foi observada uma maior vazão de pico.

Figura 67 - Resultado final da brecha para os três ensaios realizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O volume total injetado no Ensaio 2 (265,5 litros) e o tempo de rompimento após o galgamento (30 seg) foram maiores que o observado nos outros ensaios (Tabela 15). Desta forma, pode ter impactado o desenvolvimento da brecha e sua abertura, visto que pode ter movimentado uma maior quantidade de material desde o início da ruptura (que corrobora com o hidrograma de ruptura).

- Comparação com a Literatura

Algumas das conclusões de Saliba (2019) no seu trabalho (Modelagem Física com Barragens de Terra) foi que o processo de ruptura é fortemente dependente do grau de compactação. A variação do grau de compactação tem uma influência significativa sobre a taxa de erosão do maciço, o que corrobora com os resultados medidos no Ensaio 1, no qual

apresentou o maior grau de compactação do maciço e a menor quantidade de material carregado pela onda de ruptura.

Jorge (2013) conclui que o hidrograma efluente é inverso ao grau de compactação, sendo que ele observou nos ensaios realizados que a vazão de pico estimada para ruptura do aterro com menor grau de compactação (82%) foi sensivelmente o dobro do pico da vazão efluente estimado para o ensaio experimental em que o grau de compactação da barragem de aterro era mais elevado (95%). Os graus de compactação dos aterros têm relação direta com o tempo de ruptura. A vazão de pico medida no presente trabalho foi maior para o Ensaio 2 que apresentou menor grau de compactação quando comparado ao Ensaio 1. Em relação ao tempo de ruptura, neste trabalho, os tempos de ruptura foram os mesmos para o Ensaio 1 e Ensaio 2, apesar destes terem apresentado grau de compactação distintos. Essa diferença pode ser justificada pelo fato que neste trabalho a diferença entre as faixas de compactação foi menor (Ensaio 1 = 69-71% e Ensaio 2 = 65-67%) do que o observado em Jorge (2013) que foi de 82% e 95%.

5.1 Análise de Semelhança

Para determinar a relação entre os valores observados no modelo e os valores reais de um protótipo hipotético, já que esse estudo não reproduziu nenhuma barragem real, foi utilizado a semelhança através de escalas derivadas do número de Froude (conforme apresentado no item 5.1 Análise de Semelhança). Os resultados podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores correspondentes ao modelo e ao protótipo.

Etapa	Parâmetro	Ensaio Teste		Ensaio 1		Ensaio 2		
		Modelo	Protótipo	Modelo	Protótipo	Etapa	Modelo	Protótipo
I (0-7 cm)	Q de enchimento (m ³ /s)	0,0001773	17,73	0,0002717	27,17	I (0-8 cm)	0,000283	28,33
	Tempo de enchimento (min)	20	200	12	120		14	140
	Volume (m ³)	0,215	215000	0,196	196000		0,241	214000
II (7-9 cm)	Q de enchimento (m ³ /s)	0,0002127	21,26	0,00008	8,33	II (8-9 cm)	7,5E-05	7,5
	Tempo de enchimento (min)	3	30	13	130		6	60
	Volume (m ³)	0,0434	43400	0,062	62000		0,0245	24500
9 cm – romp.	Vazão de rompimento (m ³ /s)	0,0002383	23,83	0,0000867	8,67	9 cm – romp.	0,0000833	8,33
	Tempo de rompimento após galgamento (min)	00:20	03:20	00:22	03:40		00:30	05:00
	Esvaziamento reservatório (min)	4	40	5	50		8	80
	Volume total injetado (m ³)	0,2584	258400	0,258	258000		0,26555	265500
Percolação	Tempo percolação completa (min)	19	190	17	170	Tempo percolação completa (min)	14	140
Hidrograma Ruptura	Q de pico (m ³ /s)	-	-	0,00255	255,18	Hidrograma Ruptura	0,003062	306,21
	Tempo que atingiu o pico da vazão (s)	-	-	00:30	05:00		00:20	03:20
	Duração do tempo de pico (min)	-	-	00:20	03:20		00:20	03:20
	Volume (l)	-	-	0,171	171000		0,2655	265500
Balanço de Massa	Distância do material carregado (m)	1,11	110	1,11	110	Balanço de Massa	1,11	110
Brecha de Ruptura	Tamanho final (m)	0,23	23	0,15	15	Brecha de Ruptura	0,27	27
	Tempo de formação da brecha (s) - Tp	00:23	03:50	00:33	05:30		00:33	05:30

Fonte: Elaborado pelo autor.

De uma maneira geral, os valores reproduzidos em laboratório poderiam representar um protótipo real por apresentarem valores factíveis de situações reais de engenharia de barragens e de escoamentos. Por exemplo, a escala para o volume do reservatório permite concluir que o volume armazenado no modelo (volume total injetado) corresponde em escala real a uma média de 260.633 m³. Para uma barragem com 9 metros de altura considera-se o volume armazenado comparável ao de muitas estruturas reais. Como, por exemplo, a Barragem do Quati citada no item 3.4.6 Acidentes em Barragens de Terra com 7,65 m de altura e volume de 597.000 m³.

Já para a vazão no momento da ruptura, representaria um valor de 255,58 m³/s no Ensaio 1 e 306,21 m³/s no Ensaio 2 que apresenta um valor referente a corpos hídricos menores, ou barragens menores (tipos açudes) que só recebem contribuição da precipitação. Alguns exemplos referentes a bacia hidrográfica da Lagoa Mirim e do canal São Gonçalo representam, aproximadamente, essa escala. O curso hídrico Arroio Sarandi apresenta em sua foz uma vazão de 158,4 l/min para uma área de drenagem de 0,92 km², o Arroio Chuí uma vazão de 256,2 l/min para uma área de drenagem de 1,49 km² e o Arroio Pedrado uma vazão de 513,6 l/min na foz para uma área de drenagem de 2,96 km² (SEMA, 2021).

Por outro lado, em relação a escala de tempo depois do galgamento até o rompimento, utilizando o mesmo exemplo da Barragem do Quati, percebe-se que não corresponde em escala real, visto que a Barragem do Quati levou 5 h para romper após o galgamento e o maior tempo observado nos ensaios foi de 05:00 min. Essa diferença pode ser explicada pela natureza do material empregado nesse trabalho, que considerava pouca presença de argila. Com uma maior presença de argila, o tempo de rompimento acredita-se que seria menor, além de que na Barragem do Quati havia a presença de um fundo erodível.

Pode-se comparar os valores do tempo de ruptura medido nos ensaios com a literatura (referentes as equações apresentadas na Tabela 3 no item 3.6 Hidrograma de Ruptura). O maior tempo de ruptura (em uma escala real) foi observado no Ensaio 1 e Ensaio 2 e foi correspondente a 05:30 min. Percebe-se, na Tabela 18, que todos os valores referentes a literatura são maiores que os valores medidos, porém as equações de FERC, Fread e Eletrobras estão próximos e essa diferença pode ser explicada pelo tipo de material utilizado nos ensaios realizados.

Tabela 18 - Valores referentes ao tempo de ruptura a partir da literatura.

Equações	Tempo de Ruptura T_p (horas)	Resultado Tempo de Ruptura T_p
USACE	0,5 a 4,0	0,5 h = 30 min > 05:30 min
FERC	0,1 a 1,0	0,1 h = 6 min > 05:30 min
Fread	0,1 a 1,0	0,1 h = 6 min > 05:30 min
Eletrobras	0,1 a 1,0	0,1 h = 6 min > 05:30 min

Fonte: Adaptado de Faria, 2019.

Em relação ao comprimento da brecha (considerando a Tabela 3 apresentada no item 3.6 Hidrograma de Ruptura) é possível comparar os valores medidos nos ensaios com a literatura. Como as equações são uma relação da altura da barragem (H_d) os resultados são semelhantes para todos os ensaios. Considerou-se os extremos para o cálculo (menor e maior valor do intervalo considerado) e os resultados podem ser visualizados na Tabela 19. Verifica-se que os intervalos de FERC, Fread e Eletrobras englobam os valores medidos nos ensaios.

Tabela 19 - Valores referentes ao comprimento da brecha a partir da literatura.

Equações	Comprimento da Brecha (B_b)	Resultado Comprimento da Brecha (cm) - Literatura	Resultados Comprimento da Brecha (cm) - Ensaios
USACE	$0,3 \times H_d$	2,7	Ensaio Teste = 23 cm Ensaio 1 = 15 cm Ensaio 2 = 27 cm
	$0,5 \times H_d$	4,5	
FERC	$1 \times H_d$	9	
	$5 \times H_d$	45	
Fread	$2 \times H_d$	18	
	$5 \times H_d$	45	
Eletrobras	$2 \times H_d$	18	
	$4 \times H_d$	36	

Fonte: Adaptado de Faria, 2019.

Por fim, os exemplos acima e os resultados da Tabela 17 destacam que essas pequenas diferenças são inerentes da modelagem física e suas simplificações, mas que esse fenômeno de rompimento tem grande potencial para ser estudado via essa ferramenta de estudo.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Sendo o foco deste trabalho o rompimento de barragens de terra por galgamento, foi necessário desenvolver uma metodologia experimental que representasse o fenômeno real (protótipo) através de um modelo reduzido utilizando modelagem física. O intuito foi representar os acidentes em barragens de terra que ocorreram no período de abrangência do RSB 2020 e 2021.

Pelo fato da maioria dos acidentes terem ocorrido devido às chuvas intensas que ocasionaram o galgamento dessas estruturas é de suma importância compreender como essas variações de precipitação e, conseqüentemente vazão, impactam o reservatório e causam o galgamento destas estruturas.

Uma característica comum destas barragens é que elas carecem de informação em relação a caracterização da estrutura e aos eventos ocorridos, não sendo possível identificar informações básicas relacionadas ao galgamento, evolução da brecha e onda de ruptura.

Em relação a metodologia aplicada, foi realizado um ensaio inicial que permitiu compreender como seriam conduzidos os experimentos. Para isso foi necessário analisar os parâmetros relacionados ao solo e correlacioná-los com a vazão, tempo de enchimento do reservatório, ruptura, desenvolvimento da brecha e a onda de ruptura.

Um dos pontos a se considerar é em relação ao solo utilizado, que foi caracterizado como silte arenoso. O solo siltoso não possui o mesmo grau de coesão da argila (que é indicada para obras de terra pelo fato da sua coesão e impermeabilidade) e o solo arenoso é altamente permeável. Apesar do solo utilizado não caracterizar a construção das barragens de terra no Brasil, a sua utilização permitiu que fossem observados os fenômenos em escala reduzida em um período que permitisse a execução dos ensaios para realização deste trabalho.

Pode-se concluir em relação as características do solo que o Ensaio 1 apresentou o maior grau de compactação e este foi obtido com um solo mais seco (umidade de aproximadamente 6%). Neste sentido, esperava-se que o solo com a umidade próxima da úmida ótima apresenta-se esse resultado, porém a compactação não está somente relacionada com a umidade, mas também com a energia de compactação, que pode ser um dos fatores que contribuiu para este resultado. O grau de compactação do Ensaio 1 impactou na percolação de água no maciço, visto que neste ensaio o maciço não saturou quando realizado o enchimento do reservatório até a altura de 7 cm.

Outro fator importante em relação a percolação de água no maciço está associado ao tempo de enchimento do reservatório (consequentemente relacionado com a vazão). O Ensaio 1 foi o que apresentou menor tempo de enchimento do reservatório até a altura de 7 cm (11:58 min) e não se observou a saturação do maciço para essa condição, pelo contrário, a percolação de água atingiu metade do maciço. Porém, na segunda etapa do enchimento, este foi o ensaio que levou mais tempo (12:40 min) e no qual apresentou a maior deformação do talude de jusante, no qual ocorreu uma ruptura por liquefação. Observa-se que no Ensaio 2 o solo estava mais úmido (média de 14,5 %) e observou-se uma percolação completa do maciço com 13:40 min, que correspondeu a percolação mais rápida observada entre os três ensaios (Ensaio Teste = 18:56 min e Ensaio 1 = 17:25 min).

O tempo de rompimento após a água atingir a crista foi semelhante para todos os ensaios e em todos o talude de jusante estava saturado neste instante. Estes resultados quando representados em uma escala real são da faixa de três até cinco minutos. Este resultado pode ser justificado pelo fato de os ensaios terem sido realizados em um modelo de leito fixo, pois a erosão se concentrou somente no pé na barragem (pelo fato de não ter fundo erodível).

A evolução da brecha de ruptura sofreu significativas deformações nos segundos iniciais após a ruptura (até aproximadamente 30 segundos após a ruptura) e constata-se que o ensaio que teve a evolução da ruptura do centro para a lateral direita, Ensaio 2, foi o que apresentou a maior abertura da brecha e consequentemente o maior hidrograma de ruptura, no qual a vazão de pico atingiu 183,73 l/min e no qual 167 litros do reservatório foram esvaziados em 100 segundos (63% do reservatório). Isto está diretamente relacionado com a quantidade de material retido e carregado, visto que este foi o ensaio no qual se verificou a maior quantidade de material mobilizado para jusante.

Conclui-se que as diferentes distribuições temporais do enchimento do reservatório afetam o rompimento de barragens de terra, principalmente em relação a saturação do maciço. Foi possível concluir que esse parâmetro de forma isolada não é o único responsável pela ruptura e sim um conjunto de parâmetros como origem da brecha, grau de compactação, percolação do maciço e origem da brecha.

A forma como é realizado o enchimento do reservatório impacta em como o maciço vai se comportar e isso contribui diretamente para a formação da brecha, como foi verificado no Ensaio 1 no qual houve a liquefação do maciço antes da ruptura por galgamento.

A origem da ruptura foi um dos parâmetros que mais influenciou a evolução da ruptura nos ensaios realizados, principalmente no Ensaio 2 no qual está associado a maior abertura da brecha e maior vazão de pico (hidrograma de ruptura).

Não apenas características do escoamento e da brecha são importantes na análise de ruptura, o processo de ruptura de uma barragem é complexo e envolve muitos fenômenos que interagem entre si ao longo do evento (SALIBA, 2019).

Algumas dificuldades foram encontradas para a realização das simulações físicas, pelo fato da limitação de recurso disponível (solo utilizado) e de tempo hábil para execução das modificações necessárias para contornar os problemas identificados e aplicar as soluções propostas.

Desta forma, serão listadas recomendação para futuros trabalhos:

- a) Utilização de diferentes tipos de solo (desde um solo arenoso até um solo argiloso) para conseguir visualizar fisicamente (e visualmente) o efeito da percolação no maciço e o seu impacto na ruptura por galgamento.
- b) Construção da barragem em um canal com inclinação nula para permitir que a origem do rompimento seja determinada pelo processo/fenômeno e não pela declividade.
- c) Mensuração da velocidade da onda de ruptura.
- d) Utilização de um leito móvel para verificar a diferença entre a ruptura da barragem quando comparada ao leito fixo.
- e) Realizar a compactação do solo de modo que está representa a compactação utilizada para barragens de terra no Brasil (assim como a umidade)
- f) Realizar ensaios que busquem entender a percolação no maciço e que avaliam resultados com e sem a presença de drenos na barragem, com o intuito de impedir (reduzir) a percolação de água no maciço.
- g) Utilização de corante na água para identificar de uma forma mais visível a sua passagem para jusante.

Devido a carência de dados observados e medidos dos eventos reais ocorridos rupturas de barragem de terra por galgamento, espera-se que este trabalho traga subsídio para compreensão do fenômeno servindo como ferramenta e auxílio no planejamento de ações emergenciais.

7. ANEXOS

Os anexos presentes neste documento podem ser verificados a seguir.

7.3 ANEXO A

Esta Lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). O ano de 2021 foi o primeiro ano após a alteração da Lei nº 12.334/2010 pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 que passou a vigorar da seguinte forma:

- **CAPÍTULO I - DISPOSIÇÕES GERAIS**

Art. 1º Esta Lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

Parágrafo único. Esta Lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- I. altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
- II. capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);
- III. reservatório que contenha resíduos perigosos conforme técnicas aplicáveis;
- IV. categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta Lei;
- V. categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei.”

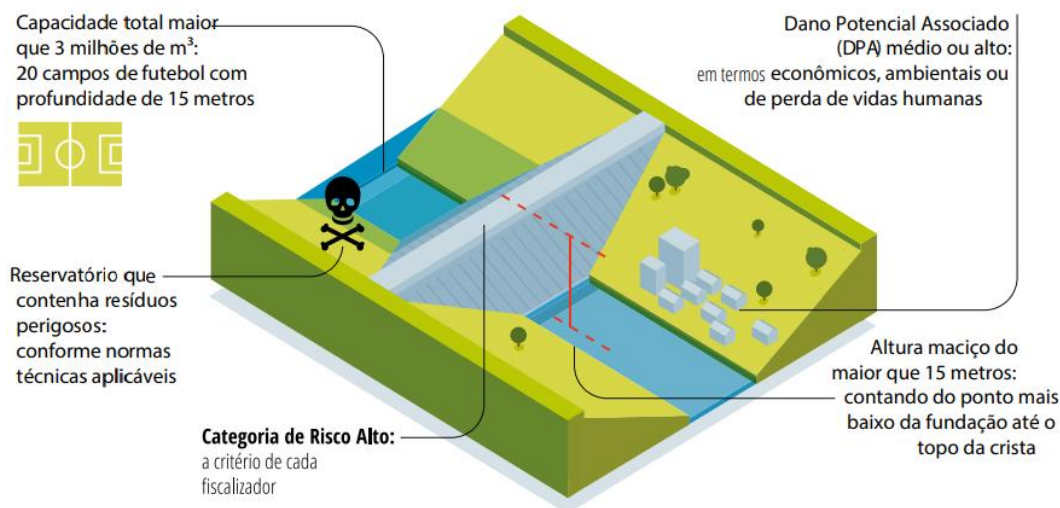


Figura 68 - Critérios de enquadramento de barragens na PNSB.

Fonte: Relatório de Segurança de Barragem (ANA, 2022).

- **CAPÍTULO II - DOS OBJETIVOS**

Art. 3º São objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB):

- VI. garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a fomentar a prevenção e a reduzir a possibilidade de acidente ou desastre e suas consequências;
- VII. regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros de barragens;
- VIII. promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;
- IX. criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;
- X. Coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;
- XI. Estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;
- XII. definir procedimentos emergenciais e fomentar a atuação conjunta de empreendedores, fiscalizadores e órgãos de proteção e defesa civil em caso de incidente, acidente ou desastre.”

- **CAPÍTULO IV - DOS INSTRUMENTOS**

Art. 6º São instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB):

- I. o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado;
- II. o Plano de Segurança da Barragem, incluído o PAE;
- III. o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de barragens (SNISB);
- IV. o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima);
- V. o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;

- VI. o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
- VII. o Relatório de Segurança de Barragens.
- VIII. o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH);
- IX. o monitoramento das barragens e dos recursos hídricos em sua área de influência;
- X. os guias de boas práticas em segurança de barragens.

Parágrafo único. Os sistemas nacionais de informações previstos neste artigo devem ser integrados.”

- SEÇÃO I - DA CLASSIFICAÇÃO

Art. 7º As barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

§ 1º A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, dos métodos construtivos, do estado de conservação e da idade do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem, bem como de outros critérios definidos pelo órgão fiscalizador.

§ 2º A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

§ 3º O órgão fiscalizador deverá exigir do empreendedor a adoção de medidas que levem à redução da categoria de risco da barragem.” (NR)

O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) foi instituído para registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo território nacional. O SNISB compreende um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações, devendo contemplar barragens em construção, em operação e desativadas. São princípios básicos de funcionamento do SNISB:

- XI. descentralização da obtenção e produção de dados e informações;
- XII. coordenação unificada do sistema;
- XIII. acesso a dados e informações garantido a toda sociedade.

7.1 ANEXO B

Anexo B - Resumo das informações retiradas do Relatório de Segurança de Barragens do ano de 2020.

Acidente	Barragem	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Município	Data (Início)	Causa
1	PCH Serra das Agulhas	20,5	3,95	Terra-Enrocamento	Monjolos/MG	25/12/2020	Rompimento da barragem devido a galgamento da estrutura decorrente das cheias históricas verificadas na região.
2	Rompimento da Barragem Bom Jesus I	sem infor.	sem infor.	Terra	Mata de São João	25/03/2020	Sofreu galgamento e subsequente erosão do aterro da barragem devido às fortes chuvas registradas na região.
3	Rompimento da Barragem Salu	0,010315	sem infor.	Terra	Simões Filho/BA	04/05/2020	Sofreu galgamento e subsequente erosão do aterro da barragem devido às fortes chuvas registradas na região
4	Rompimento da Barragem Pontal	11	2,2	Terra homogênea	Quiterianópolis/CE	16/03/2020	A estrutura do maciço não suportou o volume aportado e rompeu devido a ruptura de 5 pequenos barramentos a montante do açude Pontal.
5	Rompimento de barramentos	sem infor.	sem infor.	Terra homogênea	Hidrolândia/CE.	25/03/2020	Devido ao aumento do volume em um curto período, alguns barramentos de pequeno porte romperam.
6	Galgamento 1	5	sem infor.	Terra homogênea	Rio Novo do Sul - ES	19/01/2020	O barramento apresentava o reservatório operando em nível máximo, ou seja, os instrumentos de vazão do mesmo já estavam em capacidade máxima de escoamento, a fim de garantir a integridade das estruturas e minimizar o risco de rompimento. Em decorrência das chuvas houve galgamento da barragem, mas o barramento suportou o incidente apresentando visualmente apenas processos erosivos decorrentes do grande volume de água
7	Galgamento 2	4	sem infor.	Terra homogênea	Rio Novo do Sul - ES	19/01/2020	O barramento apresentava o reservatório operando em nível máximo, ou seja, os instrumentos de vazão do mesmo já estavam em capacidade máxima de escoamento, a fim de garantir a integridade das estruturas e minimizar o risco de rompimento. Em decorrência das chuvas houve galgamento da barragem, mas o barramento suportou o incidente apresentando visualmente apenas processos erosivos decorrentes do grande volume de água
8	Galgamento 3	4	sem infor.	Terra homogênea	Rio Novo do Sul - ES.	19/01/2020	O barramento apresentava o reservatório operando em nível máximo, ou seja, os instrumentos de vazão do mesmo já estavam em capacidade máxima de escoamento, a fim de garantir a integridade das estruturas e minimizar o risco de rompimento. Em decorrência das chuvas houve

Acidente	Barragem	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Município	Data (Início)	Causa
							galgamento da barragem, mas o barramento suportou o incidente apresentando visualmente apenas processos erosivos decorrentes do grande volume de água
9	Galgamento 4	2,5	sem infor.	Terra homogênea	Rio Novo do Sul /ES	20/01/2020	O barramento apresentava o reservatório operando em nível máximo, ou seja, os instrumentos de vazão do mesmo já estavam em capacidade máxima de escoamento, a fim de garantir a integridade das estruturas e minimizar o risco de rompimento. Em decorrência das chuvas houve galgamento da barragem, mas o barramento suportou o incidente apresentando visualmente apenas processos erosivos decorrentes do grande volume de água
10	Barragem do condomínio Paquetá	6	0,027	Terra/Terra homogênea	Catalão /GO	29/01/2020	Foi constatado que o maciço do barramento sofreu rompimento na sua parte central, causando degradação ambiental, e contribuindo para o rompimento de mais duas barragens à jusante e para a sobrecarga dos demais barramentos localizados à jusante.
11	Barragem 2 da Fazenda Santa Cruz	3	0,00315	Terra homogênea	Catalão /GO	29/01/2020	A barragem recebeu todo o volume de uma barragem que rompeu a montante, o que ocasionou o seu rompimento. Foi constatado que o rompimento se deu em sua parte central, causando degradação ambiental, e contribuindo para o rompimento de uma barragem à jusante e para a sobrecarga dos demais barramentos localizados à jusante. Observou-se indícios de galgamento. Verificou-se a presença de trincas e rachaduras.
12	Barragem da Fazenda Santa Cruz	3	0,0102	Terra homogênea	Catalão /GO	30/01/2020	A barragem recebeu todo o volume de duas barragens que romperam a montante, o que ocasionou o seu rompimento. Foi constatado que o rompimento se deu em sua parte central, contribuindo para a sobrecarga dos demais barramentos localizados à jusante. Observou-se indícios de galgamento
13	Rompimento de barragem da propriedade do Sr. Luís Antônio	5	0,006	Terra homogênea	Caturai /GO	18/04/2020	O rompimento da barragem ocorreu no meio do talude. Houve grande precipitação no dia do acidente, o que pode ter contribuído para tal.
14	Rompimento da barragem da fazenda Beira	10,2	0,0354	Terra Compactada - Solo Arenoso	Água limpa /GO	29/02/2020	Na vistoria observou-se que o solo é inadequado para este tipo de edificação, e que a propriedade se posiciona entre uma formação montanhosa e uma planície de deságue da bacia de um manancial, contribuindo para que a forte chuva ocorrida na região alcançasse o

Acidente	Barragem	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Município	Data (Início)	Causa
	Lago/das Flores.						barramento com muito volume e velocidade, sendo decisivo para o rompimento.
15	Rompimento da Barragem Fazenda Estiva 1	5	0,043198	Terra compactada	Hidrolina /GO	07/11/2020	Obstruíram o extravassor para o alteamento de 2 metros da barragem e acumular mais água, isso foi o principal fator para o galgamento, que se concentrou no meio do maciço e conseqüentemente se deu o colapso da barragem.
16	Barragem Hidrolina – afetada 1	2	0,001729	Terra compactada	Hidrolina /GO	07/11/2020	barragem situada a jusante de um rompimento de outra barragem após grande precipitação pluviométrica na região
17	Barragem Hidrolina – afetada 2	3	0,0139923	Terra compactada	Hidrolina /GO	08/11/2020	rompimento decorrente do colapso de duas barragens a montante na zona rural após grande precipitação pluviométrica na região.
18	Barragem Fazenda São Lourenço	8	0,343217	Enrocamento	Pontalina /GO	04/01/2020	as causas do rompimento foram: ocorrência de uma precipitação rara, muito volumosa.
19	Barragem Zumbi	sem infor.	sem infor.	Terra	Arcoverde/ PE	27/03/2020	rompimento da barragem.
20	Barragem das Antas	8	0,35	Terra	Sairé /PE	14/06/2020	rompimento da barragem em função de galgamento ocasionado a partir de fortes chuvas ocorridas na bacia hidrográfica, associados a possíveis problemas construtivos e recalques na crista.
21	Barragem Sítio Caldeirão	15	0,9	Terra	Brejo da Madre de Deus /PE	15/03/2020	rompimento da barragem na seção principal nas proximidades do leito do rio, após ocorrência de chuvas intensas
22	Barragem de Água do Córrego do Açude – Sítio Olhos D'água	3	0.0066	Terra	Patos de Minas /MG	26/05/2020	Foram identificadas rachaduras no maciço de terra e como medida emergencial iniciou obras de contenção, no entanto, o maciço veio a romper.
23	Rompimento de Barragem de Água – Nome desconhecido	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Medina /MG	23/01/2020	Segundo o relato, houve rompimento de uma barragem de nome desconhecido atingindo a BR-116 e inundando 1,5m acima da altura da pista, sendo interditada.
24	Rompimento de Barragem de Água na	12	0.288	Terra	Araxá /MG	27/02/2020	A barragem acumulava água para fins paisagísticos e não possuía outorga. Media cerca de 2,4 ha de espelho d'água medindo cerca de 12

Acidente	Barragem	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Município	Data (Início)	Causa
	Fazenda do Córrego do Retiro						metros de altura por 50 de comprimento. O volume acumulado foi inteiramente drenado
25	Rompimento de Barragem de Água Fazenda Gravatá - Antiga "Fazenda do Japonês"	12	0.0873	Terra	Novo Cruzeiro /MG	30/03/2020	Rompimento de barragem localizada no córrego da Saudade, Fazenda do Japonês devido a intervenção de uma máquina pá carregadeira, a qual estava realizando manutenção do maciço, o que levou ao rompimento do maciço.
26	Rompimento de Barragem de Água da Fazenda Nossa Senhora de Lourdes	sem infor.	0.019315	Terra	Ituitaba/MG	13/02/2020	Rompimento de uma barragem localizada no afluente do Córrego do Monjolinho, Fazenda Nossa Senhora de Lourdes. Não foi possível identificar a causa.
27	Rompimento de Barragem de Água em Aricanduva	sem infor.	sem infor.	Terra	Aricanduva /MG	23/01/2020	São 3 barramentos sequenciais de diferentes propriedades, nas quais foi constatado, de montante para jusante, o rompimento do vertedouro da primeira e da segunda estruturas. Na terceira estrutura, observou-se apenas o carregamento de material brejoso (solo e plantas aquáticas) que ficou acumulado na represa. Não houve rompimento desta estrutura, apenas um processo erosivo em seu vertedouro.
28	Rompimento de Barragem de Água Refúgio Vida Silvestre Macaúbas em Santa Luzia	sem infor.	sem infor.	Terra	Santa Luzia /MG	28/01/2020	Rompimento de uma barragem de perenização (água), em área superficial de 5 hectares
29	Rompimento de Barragem em Arinos	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Arinos /MG	05/03/2020	Provável rompimento de barragem registrado no sistema S2ID, não existem mais informações sobre o ocorrido
30	Barranco da Mina.	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Calçoene /AP	24/09/2020.	Deslizamento no barranco de garimpo.
31	Barragem particular	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Quiterianópolis /CE	16/03/2020	Rompimento em cascata de 5 açudes.

Acidente	Barragem	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Município	Data (Início)	Causa
32	Barragem particular.	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Iconha /ES	30/01/2020.	Rompimento.
33	Barragem particular. E	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Buriti Alegre /GO	28/02/2020	Rompimento.
34	Represa da comunidade rural de fumaça	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Orizânia /MG	24/01/2020	Rompimento (volume de chuvas).
35	Barragem particular	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Orizânia /MG	30/01/2020	Rompimento.
36	Sem identificação	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Urucânia /MG	03/05/2020	Rompimento de tanque de contenção.
37	Fazenda Água Santa. E	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Perdizes /MG	31/05/2020	Rompimento.
38	Mina do Córrego do Feijão	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Brumadinho /MG	18/12/2020.	Deslizamento de terra de talude de cava paralisada.
39	Sem Identificação	sem infor.	sem infor.	sem infor.	São Sebastião do Umbuzeiro /PB	23/03/2020	Galgamento e rompimento de 5 barragens em cascata.
40	Barragem Guilherme Pontes	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Sairé /PE	15/06/2020	Rompimento.
41	Dique da Boianga (Três Vendas)	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Campos dos Goytacazes /RJ.	29/01/2020	Rompimento de dique.
42	Sem identificação.	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Janduis /RN.	22/04/2020.	Rompimento de açude
43	Propriedade Particular.	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Palmitos/SC	11/06/2020	Rompimento.
44	Propriedade Particular	sem infor.	sem infor.	sem infor.	Joaçaba /SC	18/06/2020.	Rompimento.

Fonte: ANA, 2021.

7.2 ANEXO C

Anexo c - Resumo das informações retiradas do Relatório de Segurança de Barragens do ano de 2021.

Acidente	Barragem	Altura (m)	Volume (hm ³)	Material	Município	Data (Início)	Causa
1	Pirocaua	7	0,16	Terra homogênea	Godofredo Viana /MA	25/03/2021	rompimento de dique de contenção de sedimento por brecha, causada por galgamento em função de chuva decamilenar ocorrido na região.
2	Rompimento de Barragem em Jussiapé	7	1,234	Alvenaria de pedra	Juassiapé /BA	26/12/2021	galgamento em virtude das fortes chuvas, houve colapso da porção central do barramento. Onde de propagação de cheia atingiu, "sem maiores danos", duas casas.
3	Quatis dos Fernandes	sem infor.	sem infor.	Terra	Vitória da Conquista /BA	25/12/2021	barragem de terra sofreu galgamento em virtude das fortes chuvas registradas na região e houve colapso da estrutura. A estrutura colapsou na noite do evento e atingiu outra barragem que também sofreu galgamento e, por conseguinte, novo colapso.
4	Barragem do Iguá	sem infor.	sem infor.	Terra	Vitória da Conquista/ BA	25/12/2021	estrutura colapsou com a onda de propagação proveniente do rompimento da barragem de montante (Quatis dos Fernandes)
5	Rompimento de Barragem de Goiatuba na Vila Betânia	2,5	0,007	Terra homogênea	Goiatuba /GO	03/11/2021	galgamento na ombreira esquerda danificando a estrutura do maciço.
6	Curral de Dentro 01	7	0,6	Terra	Curral de Dentro /MG	28/12/2021	galgamento próxima da ombreira esquerda, provocando brecha e liberando volume de água para barragem logo a jusante.
7	Curral de Dentro 02	5	0,5	Terra	Curral de Dentro /MG	28/12/2021	galgamento na seção central da barragem, provocando brecha e liberando todo o volume acumulado
8	Curral de Dentro 03	2	0,14	Terra e pedra	Curral de Dentro /MG	28/12/2021	volume de cheia provocando o galgamento na junção da pedra com a terra e em parte do maciço de terra, e/ou percolação entre a junção, provocando brecha de abertura.
9	Curral de Dentro 04	3	0,04	Terra	Curral de Dentro /MG	28/12/2021	galgamento na parte central da barragem, provocando brecha e liberando todo o volume armazenado para jusante, que percorrendo cerca de 1,5km alcançou e provocou o galgamento de outra barragem (Acidente Curral de Dentro 05)

Acidente	Barragem	Altura (m)	Volume (hm³)	Material	Município	Data (Início)	Causa
10	Curral de Dentro 05	3	0,04	Terra	Curral de Dentro /MG	28/12/2021	galgamento na parte central, da barragem, provocando brecha e liberando todo o volume armazenado para jusante. A montante, evento similar ocorreu na barragem descrita no Acidente Curral de Dentro 04, onde todo o volume liberado foi direcionado para a presente estrutura.
11	Curral de Dentro 06	3	0,06	Terra	Curral de Dentro /MG	28/12/2021	galgamento na seção central do maciço provocando brecha e esvaziamento de todo o reservatório.
12	Matucho	sem infor.	sem infor.	Terra homogênea	Visconde de rio Branco /MG.	03/08/2021	rompimento de parte do talude lateral da barragem, utilizada para abastecimento de água do município.
13	Rompimento comporta	3,5	0,023	Terra	Piraf do Sul /PR	27/01/2021	ocorreu o esvaziamento do reservatório, com rompimento de um lado da comporta.

Fonte: ANA, 2022.

7.2 ANEXO D

Anexo D - valores considerados referentes aos parâmetros de cada equação.

Parâmetro	Descrição	Valor adotado	unidade
Vw	volume antes de romper	De acordo com cada ensaio	m ³
Vm	volume máximo do reservatório para o nível de água máximo	0,265	m ³
As	área do reservatório para o nível de água máximo	2,92	m ²
Bd	largura da barragem	0,048	m
Hd	altura da barragem	0,09	m
Bb	largura final da brecha	De acordo com cada ensaio	m
Hb	altura final da brecha	0	m
Ymédio	profundidade média no reservatório no instante da ruptura (m)	0,09	m
g	aceleração da gravidade	9,81	m ² /s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Valores considerados para cada ensaio (Bb e Vw).

Ensaio	Bb	Vw
Teste	23	258
1	15	258
2	27	265,5

7. REFERÊNCIAS

ABGR. Associação Brasileira de Gerenciamento de Riscos. **Mais um acidente com barragem, agora na Bahia. Bahia, 2019.** Disponível em: <https://www.abgr.com.br/noticias?id=476>. Acesso em: 07 mar. 2023.

ANM. Agência Nacional De Mineração. **Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022: consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.** Brasília, DF: ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/ptbr/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-95-2022.pdf>. Acesso em: 07 set. 2023.

ALMEIDA, Marínis Maria de. **Estudo tensão deformação de barragem de terra e enrocamento.** Ouro Preto, 2010. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Curso de segurança de barragens.** 2016. Disponível em: <https://progestao.ana.gov.br/destaque-superior/boas-praticas/seguranca-de-barragens/curso-de-seguranca-de-barragens-dae-1/aula-3-segur-barragem-2016tipo.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Definições Importantes sobre Segurança de Barragens.** Brasília, 2022. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/outros/definicoes-importantes-sobre-seguranca-de-barragem.pdf/view. Acesso em: 08 fev. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório de segurança de barragens 2018.** Brasília, 2019. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/portal/snisp/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2018/rsb2018_0312.pdf. Acesso em: 16 mai. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório de segurança de barragens 2021.** Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisp/documentos-e-capacitacoes/rsb>. Acesso em: 19 jan. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório de segurança de barragens 2020.** Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisp/documentos-e-capacitacoes/rsb>. Acesso em: 30 jan. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório de segurança de barragens 2019.** Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisp/documentos-e-capacitacoes/rsb>. Acesso em: 02 fev. 2023.

BIRCK, Mateus. **Barragens de terra homogênea: uma análise crítica entre os projetos empírico e científico.** Porto Alegre, 2016. Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Esta Lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB)**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 189, p. 1-3, 15 set. 2010. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/8135523/pg-1-secao-1-diario-oficial-da-uniao-dou-de-21-09-2010>>. Acesso em: 19 fev. 2023.

CAMPOS, Marco Túlio Pereira de. **IV Compactação dos Solos. Notas de Aula de Geotecnia I**. Pontifícia Universidade de Goiás, s.d. Disponível em: <<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/2386/material/IV%20-%20Compacta%C3%A7%C3%A3o%20dos%20Solos.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2023.

CNDH. Conselho Nacional dos Direitos Humanos. **Relatório da missão emergencial nos municípios de Pedro Alexandre e Coronel João Sá/BA após rompimento da barragem do Quati**. Bahia, 2019.

DA SILVA, André Felipe Rocha; RIBEIRO, Celso Bandeira de Melo. **Estudo Dos Hidrogramas Formados Por Piping E Galgamento Para Propagação De Onda De Cheia Proveniente De Ruptura De Barragem-Estudo De Caso: Barragem De Chapéu d'uvas-Mg**. Juiz de Fora/MG, 2018. III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

ELETRORÁS. Centrais Elétricas Brasileiras. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro (RJ), 199p. Disponível em:<www.eletrabras.com.br>. Acesso em: 23 abr. 2023, v. 21, 2000.

ESPARTEL, Lélis. **Análise hidrodinâmica da onda gerada através da ruptura instantânea de uma barragem**. Porto Alegre, 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

EUCLYDES, Humberto Paulo et al. **Atlas digital das águas de Minas: uma ferramenta para o planejamento e gestão dos recursos hídricos**. Belo Horizonte: Ruralminas/UFV, 2005.

FARIA, Fábio Luis França et al. **Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens**. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, v. 36, n. 3, 2019.

G1. **Governo confirma rompimento de barragem em cidade na Bahia**. Bahia 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2019/07/12/governo-confirma-rompimento-de-barragem-em-cidade-na-bahia.ghtml>>. Acesso em: 15 fev. 2023.

GALEANO, Jacqueline Correa. **Estimativa de hidrogramas e propagação de onda de cheia proveniente da ruptura hipotética de pequenas barragens**. Porto Alegre, 2016. Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

GREGORETTI, Carlo; MALTAURO, Alessandro; LANZONI; Stefano. **Laboratory Experiments on the Failure of Coarse Homogeneous Sediment Natural Dams on a Sloping Bed**. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING © ASCE, 2010: 868-879.

ICOLD. International Commission On Large Dams. **General Synthesis**, 2020. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp>. Acesso em: 14 fev. 2023.

IMASUL – Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. **Guia Prático de Manutenção de Barragens de Terra**. Disponível em: <<https://www.imasul.ms.gov.br/seguranca-de-barragem-2/>>. Acesso em: 23 mar. 2023.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. **Segurança de Barragens**. Brasil, 2023. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/seguranca-hidrica/seguranca-de-barragens/#:~:text=A%20seguran%C3%A7a%20de%20barragens%20se,v%C3%ADtimas%20em%20todo%20o%20mundo>>. Acesso em: 14 fev. 2023.

JOHNSON, F. A.; ILLES, P. **A Classification of Dam Failures**. Water Power and Dam Construction, 1976.

JORGE, Ricardo. **Rotura de barragens de aterro por galgamento. Ensaios experimentais com aterros homogêneos**. Lisboa, 2013. Mestrado integrado em engenharia da energia e do ambiente. Universidade de Lisboa, Faculdade de ciências, Departamento de engenharia, geografia, geofísica e energia.

JULIEN, P. Y. **River Mechanics**. Cambridge University Press. 434 p, 2002.

MACHADO, Willian Pereira Ribas. **Utilização de metodologia simplificada para avaliação de ruptura hipotética de barragens-estudo de caso: UHE Pedra do Cavalo (BA)**. Porto Alegre, 2022. Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARCHETTI, Alexandre. Itaipu Binacional. **SANEAMENTO DA REGIÃO**. Vista aérea das áreas internas da usina. 2010.

MEIRELLES, Fernando Setembrino Cruz. **Unidade 9: Barragens De Terra e Enrocamento. In CURSO SEGURANÇA DE BARRAGENS, Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos E Socioambientais**. ANA, 2014.

MELLO, Flavio Miguez de; SANDRONI, Sandro Salvador; GUIDICINI, Guido. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil**. Livro Eletrônico. Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro, 2021.

MELO, Luisa. **Entenda o que é liquefação, fenômeno que pode levar barragens ao colapso**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/02/07/entenda-o-que-e-a-liquefacao-fenomeno-que-pode-levar-barragens-ao-colapso.ghtml>. Acesso em: 19 ago. 2023.

MOTTA, Paulo Roberto. **Administração para o desenvolvimento: a disciplina em busca da relevância**. Revista de Administração Pública, v. 6, n. 3, p. 39 a 54-39 a 54, 1972.

OLIVEIRA, Thays et al. **Avaliação de Modelos Físicos Reduzidos Construídos em Laboratório para o Estudo da Percolação de Água em Duas Barragens Homogêneas de Terra**. Salvador, 2018. Trabalho apresentado no XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano.

PAGOTTO, Artur. **Estudo de ruptura de barragem por piping**. Florianópolis, 2017. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil da universidade do sul de Santa Catarina.

PROCTOR, R. **Fundamental principles of soil compaction**. Engineering news-record, v. 111, n. 13, 1933.

SALIBA, Aloysio Portugal Maia. **Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado**. Belo Horizonte, 2009. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

SEMA – Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. Grupo de Trabalho de Segurança de Barragens. **Relatório de Atividades de 2022**. Rio Grande do Sul, 2022.

SEMA. Secretária do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Disponibilidade Hídrica** Anexo. Porto Alegre, 2021. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202110/21190035-nt-dipla-2021-004-disponibilidade-hidrica-anexo.pdf>>. Acesso em 26 ago. 2023.

SNISB. Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. **Perguntas Frequentes**. Brasil, 2023. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/perguntas-frequentes>>. Acesso em: 24 fev. 2023.

SOUZA, Mariana. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani/SC**. Rio de Janeiro, 2013. Trabalho de conclusão de curso apresentado a Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro para obtenção do grau de engenheiro civil.

STEPHENS, Tim et al. **Manual on small earth dams: a guide to siting, design and construction**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2010.

STEPHENS, Tim. **Manual sobre pequenas barragens de terra-Guia para a localização, projeto e construção**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.

TRAUTWEIN, Daniel; GUIMARÃES, Adinele Gomes; FILHO, Geraldo Lúcio Tiago. **Simulação e estudo das Deformações que Precedem o Rompimento de Barragens através de Modelo Reduzido**. Engenharia, Gestão e Inovação. 1ed. Belo Horizonte: Poisson, v. 4, p. 21-31, 2022.

VIANA, Deyved. **Sensacional açude Orós dados atualizados hoje 08/04/2023 Ceará**. Ceará, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5Sv2O_HsM5E&t=16s>. Acesso em: 09 abr. 2023.

WORLD COMMISSION ON DAMS. Dams and development: A new framework for decision-making: The report of the world commission on dams. Earthscan, 2000.

WYLAM, K. E. Hazard Potential Classification Assessment for the CCR Impoundment. Iowa: MidAmerican Energy Company, Louisa Generating Station, 2016.