

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCAS MIGOTTO ALVES

**ESTUDO COMPARATIVO EM MODELO REDUZIDO DO USO DE
ENROCAMENTO E GEOMEMBRANA EM PROTEÇÃO DO TALUDE DE
MONTANTE DE BARRAGENS DE TERRA**

**Alegrete
2023**

LUCAS MIGOTTO ALVES

**ESTUDO COMPARATIVO EM MODELO REDUZIDO DO USO DE
ENROCAMENTO E GEOMEMBRANA EM PROTEÇÃO DO TALUDE DE
MONTANTE DE BARRAGENS DE TERRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

**Alegrete
2023**

LUCAS MIGOTTO ALVES

**ESTUDO COMPARATIVO EM MODELO REDUZIDO DO USO DE
ENROCAMENTO E GEOMEMBRANA EM PROTEÇÃO DO TALUDE DE
MONTANTE DE BARRAGENS DE TERRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 07, fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Jaelson Budny
(UNIPAMPA)

Prof^a. Juliana Calage Quevedo
(IFFAR)



Assinado eletronicamente por **Juliana Calage Quevedo, Usuário Externo**, em 09/02/2023, às 10:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/02/2023, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **WILBER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/02/2023, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_or_gao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1048683** e o código CRC **ED18C5F0**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, aos meus avôs (*in memoriam*): Vanderlan Rodrigues Alves e Vitorino Rui Migotto, e a todos que estiveram do meu lado nessa trajetória, dando-me apoio, conselhos e incentivos ao longo da faculdade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me proporcionar saúde e sabedoria em minha vida. Toda glória ao seu nome!

Agradeço imensamente à minha família por todo o incentivo, educação, amor incessante, apoio e inúmeros conselhos dados em minha vida.

À minha avó Lelis Bortolin, que desde o início da faculdade, com todo seu carinho por mim, estava sempre a me orientar e colocou-se à disposição para me ajudar com os custos que a faculdade demandava, com a maior vontade não mediu esforços para colaborar com meu sonho da graduação.

À minha mãe Rosana Migotto, meu irmão Miguel Migotto e avó Lélis: sou eternamente grato a vocês por estarem sempre comigo. Obrigado minha mãe. Toda educação dada a mim desde criança, me fez chegar até aqui.

Ao meu pai Vanclei Alves e minha avó Helena de Almeida: sem vocês também nada disso seria realidade. O incentivo para seguir em frente com certeza é uma das coisas mais importantes para o êxito.

Em especial, aos meus avôs falecidos, Vanderlan Rodrigues Alves e Vitorino Rui Migotto, vocês são minha luz e maiores exemplos como homens de bem. O que sou hoje, com certeza também é pela educação que vocês me passaram.

Agradeço imensamente a Gabrieli Pinarello Pizzolato, pelo companheirismo e todo amor, tenho muito orgulho de você, pela pessoa dedicada que és, ótima engenheira eletricista, e o mais importante: uma pessoa com grande coração!

Agradeço a Universidade Federal do Pampa, por me proporcionar cursar essa graduação, e a todos professores que passaram por ela. Vocês me ensinaram muito... não apenas conhecimentos técnicos, mas contribuíram para minha evolução pessoal e profissional.

Ao meu orientador, professor Wilber, sou grato por todos ensinamentos e pela dedicação em me ajudar ao longo de toda a pesquisa. Suas contribuições foram extremamente valiosas, as quais levarei para toda minha vida. És um exemplo de profissional, do qual guardo repleta admiração.

Agradeço imensamente a empresa Lonafort Comércio de Lonas para Tanques e Reservatórios Ltda, por colaborar com a doação da geomembrana para meu trabalho.

Não menos importante, agradeço a todos os amigos que fizeram parte dessa trajetória, por proporcionar boas conversas, risadas, conselhos e ajuda para o desenvolvimento do meu trabalho.

Agradeço também, aos meus animais de estimação, Bob e Frajolão, pode parecer brincadeira, mas em momentos em que eu me encontrava escrevendo e estudando, a presença deles amenizava a tensão de querer realizar um trabalho bem feito.

Por fim, agradeço a mim mesmo, por nunca desistir, buscando evoluir constantemente. Sempre soube, que todo êxito em minha vida só depende de mim, do meu esforço e dedicação. Tendo em vista isso, e aplicando no meu dia a dia, creio que meu caminho será de constantes realizações.

“Pensar é o trabalho mais difícil que existe. Talvez por isso tão poucos se dediquem a ele”.

Henry Ford

RESUMO

Em barragens, garantir a segurança é fator primordial na construção e operação, buscando evitar possíveis acidentes que conseqüentemente venham gerar riscos ambientais e outros danos. Um dos principais fatores que ocasionam estes acidentes são barragens mal projetadas, como por exemplo, a falta de proteção nos taludes destas barragens, as quais estas, deveriam suportar grandes volumes de precipitações e impactos ocasionados por fenômenos naturais, tais como vento, que gera ondas no reservatório, ocasionando assim, patologias no talude de montante pelo impacto das mesmas. O presente trabalho teve como objetivo abordar o uso de geomembrana como proteção do talude de montante, de barragem de terra, com a finalidade de evitar erosão no talude, ocasionada pelo impacto das ondas formadas no reservatório. Para isso, foi elaborado um modelo físico reduzido de barragem de terra, em que foram executadas três simulações, sendo elas: modelo físico reduzido de barragem sem proteção de *rip-rap*, modelo físico reduzido de barragem com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento e, modelo físico reduzido de barragem com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana. Nas três simulações realizadas no modelo reduzido, também foi simulado ondas no reservatório com uma determinada frequência e altura. Com isso, foi elaborado um dispositivo manual, para gerar as ondas no interior do reservatório. Por fim, com os resultados obtidos nas três simulações no modelo reduzido, foi feita uma análise comparativa, verificando-se que o modelo físico reduzido de barragem sem proteção de *rip-rap*, mostrou ser mais suscetível ao processo de erosão devido ao impacto das ondas. Diferentemente, o uso da geomembrana como material de proteção do talude, mostrou-se eficiente, não sendo registradas patologias vinculadas a erosão e remoção de solos granulares.

Palavras-Chave: Barragem, Geomembrana, Simulações, *Rip-rap*.

ABSTRACT

In dams, ensuring safety is a key factor in construction and operation, seeking to avoid possible accidents that consequently generate environmental risks and other damages. One of the main factors that cause these accidents are poorly designed dams, such as the lack of protection on the slopes of these dams, which should withstand large volumes of precipitation and impacts caused by natural phenomena, such as wind, which generates waves, in the reservoir, thus causing pathologies on the upstream slope due to their impact. The present work aimed to address the use of geomembrane as protection of the upstream slope of an earth dam, in order to avoid erosion on the slope, caused by the impact of waves formed in the reservoir. For this, a reduced physical model of an earth dam was prepared, in which three simulations were performed, namely: reduced physical model of a dam without rip-rap protection, reduced physical model of a dam with rip-rap protection under the use of rockfill and reduced physical model of the dam with protection of the upstream slope using geomembrane. In the three simulations carried out in the reduced model, waves in the reservoir with a certain frequency and height were also simulated. With that, a manual device was elaborated to generate the waves inside the reservoir. Finally, with the results obtained in the three simulations in the reduced model, a comparative analysis was carried out, verifying that the reduced physical model of a dam without rip-rap protection, proved to be more susceptible to the erosion process due to the impact of waves. In contrast, the use of geomembrane as a slope protection material proved to be efficient, with no pathologies linked to erosion and removal of granular soils being registered.

Keywords: Dam, Geomembrane, Simulations, Rip-rap.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem de terra homogênea	21
Figura 2 – Barragem de terra zoneada com núcleo central impermeável	22
Figura 3 – Barragem de terra zoneada com camada impermeável sobre o talude de montante	23
Figura 4 – Barragem de terra homogênea e seus principais elementos	25
Figura 5 – <i>Rip-rap</i> deslocado ou destruído	27
Figura 6 – Erosão no talude de montante ocasionada por uma camada de <i>rip-rap</i> mal graduada.....	28
Figura 7 – Deslizamento	28
Figura 8 – Altura da borda livre e ondas na barragem	30
Figura 9 – Gráfico das isopletas da velocidade básica do Brasil	33
Figura 10 – Geomembrana.....	34
Figura 11 – Diferentes opções de aplicação da geomembrana em barragem de terra	36
Figura 12 – Geotêxtil não tecido.....	39
Figura 13 – Exemplo de modelo físico reduzido de barragem de terra	41
Figura 14 – Fluxograma da proposta de trabalho	43
Figura 15 – Dimensões do dispositivo manual para gerar ondas	45
Figura 16 – Dispositivo manual para gerar ondas instalado no tanque.....	45
Figura 17 – Tanque de descarga por orifícios e suas respectivas dimensões.....	46
Figura 18 – Vista aérea da área de coleta da areia.....	47
Figura 19 – Vista panorâmica da área de coleta da areia	48
Figura 20 – Corte realizado na geomembrana de PEAD	50
Figura 21 – Corte realizado no geotêxtil não tecido	51
Figura 22 – Vista frontal do esboço do modelo reduzido de barragem de terra.....	53
Figura 23 – Vista isométrica do esboço 3D do modelo reduzido de barragem de terra	54
Figura 24 – Disposição do material granular no barramento	55
Figura 25 – Montagem do filtro vertical e horizontal	56
Figura 26 – Montagem do modelo reduzido da barragem de terra.....	56
Figura 27 – Modelo reduzido de barragem de terra de terra sem proteção de <i>rip-rap</i>	57

Figura 28 – Modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção de <i>rip-rap</i> sob uso de enrocamento.....	58
Figura 29 – Modelo reduzido de barragem de terra com fita métrica e régua na parte frontal do tanque de acrílico.....	59
Figura 30 – Modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana.....	60
Figura 31 – Enchimento do reservatório controlando a vazão de entrada.....	61
Figura 32 – Teste realizado para gerar a onda de 7,20 mm.	63
Figura 33 – Efeito da capilaridade conforme aumentava nível de água.....	64
Figura 34 – Filtro vertical e Filtro horizontal drenando o fluxo de água.....	65
Figura 35 – Talude de jusante saturado devido ao efeito de capilaridade.....	66
Figura 36 – Saída de água no reservatório.....	67
Figura 37 – Erosão parcial do talude de montante no intervalo de 0 a 10 minutos. 68	
Figura 38 – Erosão parcial do talude de montante.....	68
Figura 39 – Erosão devido à altura da onda ocasionada pela velocidade de impacto no talude.....	69
Figura 40 – Erosão devido ao repuxo da onda.....	70
Figura 41 – Enchimento do reservatório para o segundo experimento.....	71
Figura 42 – Diminuindo o impacto da queda de água para enchimento do reservatório.....	72
Figura 43 – Erosão devido ao impacto da onda no talude de montante.....	73
Figura 44 – Remoção do material granular do talude de montante.....	73
Figura 45 – Erosão de 2,5 cm do talude de montante.....	74
Figura 46 – Erosão de 3,5 cm do talude de montante.....	75
Figura 47 – Visualização dos efeitos em 10 a 20 minutos de experimento.....	76
Figura 48 – Visualização dos efeitos em 20 a 30 minutos de experimento.....	76
Figura 49 – Visualização frontal dos efeitos em 20 a 30 minutos de experimento .	77
Figura 50 – Aumento da remoção de material granular no talude de montante.....	78
Figura 51 – Erosão no talude de montante de barragem de terra.....	79
Figura 52 – Geomembrana sob o talude de montante sem ancoragem.....	80
Figura 53 – Intervalo de 0 a 10 minutos do primeiro ensaio com geomembrana sobre o talude de montante.....	81
Figura 54 – Sobreposição do material granular nas laterais da geomembrana.....	82

Figura 55 – Erosão no talude de montante com proteção sob uso de geomembrana sem ancoragem.....	83
Figura 56 – Aumento da erosão lateral em intervalo de 20 a 30 minutos	83
Figura 57 – Eficiência do filtro vertical e horizontal em uma barragem de terra.....	84
Figura 58 – Remoção da geomembrana sobre o talude de montante.....	85
Figura 59 – Análise da remoção da geomembrana sobre o talude de montante....	86
Figura 60 – Estrutura do barramento reconstruída com acréscimo de areia saturada	86
Figura 61 – Geomembrana com vedação nas laterais utilizando fita adesiva transparente.....	87
Figura 62 – Intervalo de 0 a 10 minutos de ondas sem alteração na estrutura do barramento sob utilização de geomembrana ancorada	88
Figura 63 – Intervalo de 10 a 20 minutos de ondas sem alteração na estrutura do barramento sob utilização de geomembrana ancorada	89
Figura 64 – Intervalo de 20 a 30 minutos de ondas sem alteração na estrutura do barramento sob utilização de geomembrana ancorada	90
Figura 65 – Sem indício de algum fenômeno decorrente ao impacto da onda no talude de montante.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espessura da camada de <i>rip-rap</i> em relação à altura máxima de ondas no reservatório.....	27
Tabela 2 – Velocidades médias mensais do vento em 10 anos de coleta de dados	31
Tabela 3 – Velocidades máximas mensais do vento em 10 anos de coleta de dados	32
Tabela 4 – Diferentes aplicações e estudos com a geomembrana.....	37
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de caracterização do solo eólico	49
Tabela 6 – Dimensões do modelo físico reduzido	52
Tabela 7 – Pesquisa verbal com proprietários de barragens de terra	62
Tabela 8 – Resultados encontrados nas três simulações experimentais	93

LISTA DE ABREVIATURAS

p. – página

n° - número

m – metros

km - quilômetro

h – hora

s – segundos

mm – milímetros

cm – centímetros

H – altura da barragem

t – espessura da fundação

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional das Águas

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens

CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente

GM – Geomembrana

IFFAR – Instituto Federal Farroupilha

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ISO – Organização Internacional de Padronização

NBR – Norma Brasileira

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PVC – Polivinil Clorado

PVC-P – Policloreto de Vinila com Plastificante

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivo específico	19
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	Conceitos gerais de barragens de terra	20
2.1.1	Elementos que constituem as barragens de terra	23
2.2	Patologias em taludes de montante e seus efeitos	25
2.3	Velocidade de ventos e seus efeitos a geração de ondas em reservatórios de barragens	29
2.4	Uso de Geomembranas em barragens de terra	34
2.4.1	Outros geossintéticos complementares ao uso de geomembranas	38
2.5	Modelos reduzidos de barragens de terra	39
3	METODOLOGIA	43
3.1	Proposta e montagem do modelo reduzido	44
3.2	Caracterização dos materiais utilizados	46
3.2.1	Tanque de descarga por orifícios	46
3.2.2	Caracterização do solo	47
3.2.3	Materiais geossintéticos	49
3.3	Montagem do modelo reduzido	51
4	RESULTADOS E ANÁLISES	62
4.1	Altura máxima da onda	62
4.2	Modelo físico reduzido de barragem de terra sem proteção de <i>rip-rap</i>	64
4.3	Modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção de <i>rip-rap</i> sob uso de enrocamento	71

4.4	Modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana.....	79
4.5	Análise comparativa	92
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
	REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra são elementos estruturais que possuem diversas finalidades quanto ao uso, sendo geralmente utilizadas para práticas de irrigação, servindo quantidade necessária de água ao proprietário para irrigar sua lavoura e, com isso colaborando para o desenvolvimento econômico e sustentável.

Com base nas pesquisas bibliográficas, para obter um acúmulo de água, as barragens devem ser construídas em uma cota mais baixa na bacia hidrográfica, transversal à direção que ocorre os cursos de águas, com isso, formando um reservatório.

Na agricultura, as barragens geralmente vistas são de pequeno porte, precisando acumular pequenos volumes de água, conseqüentemente, o custo da obra é relativamente menor comparado às obras de barragens de grande porte. Porém, como qualquer outra estrutura de terra, o seu projeto requer muito cuidado e atenção, dando ênfase, primordialmente, à segurança e estabilidade que o maciço deverá apresentar, pois os acidentes em barragens de terra geralmente são irreversíveis e, com isso, podem vir a trazer riscos às vidas humanas e, colaboram para impactos negativos ao meio ambiente.

Massad (2010) relata que a segurança de uma barragem deve ser garantida principalmente quanto ao transbordamento, ao *piping*, à ruptura dos taludes de montante e de jusante e, ao efeito das ondas formadas pelas ações do vento.

As ondas quando formadas no reservatório, colidem contra o talude de montante e, com uma determinada velocidade e altura de onda, possibilitam a ocorrência de formação de sulcos de erosão. Ainda, Massad (2010, p. 187) descreve que “Esse efeito é combatido construindo-se um *rip-rap*, isto é, camadas de enrocamento e transição, estendendo-se na face do talude de montante.”

Tendo em vista essa patologia que ocorre em taludes de montante de barragens de terra, que compromete a estabilidade da estrutura, este trabalho tem como objetivo expor o uso de geomembrana como proteção do talude de montante. Sendo executadas três simulações em um modelo físico reduzido de barragem de terra. Para isso, foi elaborado, um dispositivo que simule ondas no reservatório, tentando simular uma ocorrência de erosão no talude de montante.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo abordar o uso de geomembrana como proteção do talude de montante, de barragem de terra, com a finalidade de evitar erosão no talude, ocasionada pelo impacto das ondas formadas no reservatório.

1.1.2 Objetivo específico

Elaborar um modelo físico reduzido de barragem de terra, em que foram executadas três simulações, sendo elas: modelo físico reduzido de barragem de terra sem proteção de *rip-rap*, modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento e, modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceitos gerais de barragens de terra

Há muito tempo a raça humana tem realizado formas de armazenar água para diversas finalidades, e ao passar do tempo, a literatura a respeito deste assunto tem evoluído muito.

No artigo VI do segundo parágrafo, na Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente nº 323/2016 o conceito de barragem é definido como:

Qualquer estrutura artificial de terra, alvenaria, concreto simples ou armado, localizada em um curso d'água superficial permanente ou intermitente, excluídos aqueles de características efêmeras, para fins de contenção ou acumulação de água, devendo ser constituído de mínimo maciço e vertedouro, podendo sua área alagada atingir Área de Preservação Permanente (APP) (Resolução do CONSEMA nº 323/2016).

De acordo com Comitê Brasileiro de Barragens – Apresentação das Barragens (2022), “as barragens, definidas como obstáculos artificiais com a capacidade de reter água, qualquer outro líquido, rejeitos, detritos, para fins de armazenamento ou controle, podem variar de tamanho”. As barragens de terra podem ser construídas e caracterizadas em pequeno porte, para servir à pequenas propriedades possuindo um volume de acúmulo de água menor e, também serem barragens de grande porte, feitas geralmente para práticas de irrigação de grandes áreas de lavouras, com intuito de reservar um maior volume de água pluviométrica, acumulando estas águas por meio de cursos de água geradas por desníveis da bacia hidrográfica onde situa-se a barragem. Ainda conforme CBDB (2022), as barragens de terra também servem para controle de cheias, onde elas são projetadas para atender a um volume máximo de cheias provável de uma determinada região.

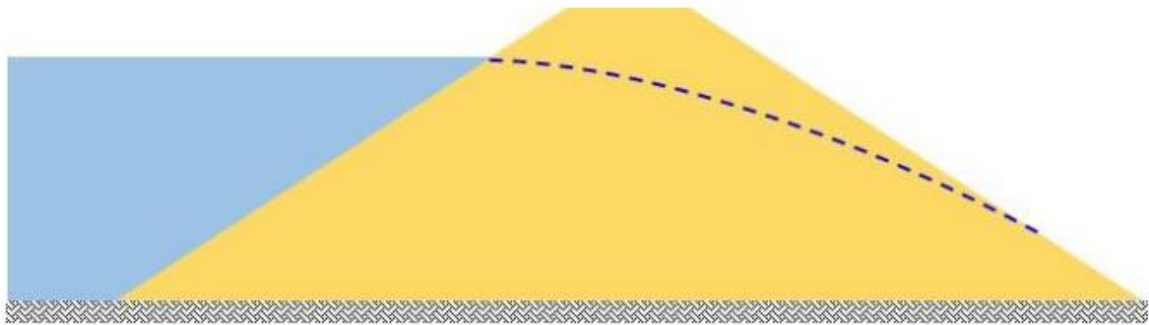
Com isso, as barragens de terra de modo geral, normalmente vistas pelo estado do Rio Grande do Sul, têm por sua finalidade acumular águas pluviométricas, armazenando-as, formando um reservatório a fim de irrigar uma determinada cultura. Também, conforme Gomes e Teixeira (2017) é relatado que as barragens podem ser

construídas com a finalidade de controlar a vazão; regularizando-a. Bem como o abastecimento doméstico e industrial, irrigação, entre outras finalidades.

Segundo pesquisas bibliográficas realizadas (Costa, 2012; Almeida, 2019; Pierozan, 2014; Oliveira, 2018; Nóbrega, 2018; Souza, 2013; Netto, 2019; Tomaz, 2011 dentre outros autores), há dois diferentes tipos de barragens de terra, podendo ser barragens homogêneas e zoneadas.

As barragens de terra homogêneas ou simples, ainda conforme Gomes e Teixeira (2017), são barragens que o maciço inteiro é construído com um único tipo de material. Geralmente para este caso, a recomendação é de que para a sua construção seja feito um levantamento topográfico e um estudo de caso levando em consideração toda viabilidade técnica e econômica, pois o mesmo solo extraído do local das escavações onde a barragem será construída, poderá servir para a construção da mesma economizando em movimentação de terra e transporte, mas para isso, o solo deverá oferecer as condições ideais para a construção e impermeabilização, atendendo a todos critérios de análises e testes para definir se o solo poderá servir para a obra de terra. Na Figura 1, observa-se abaixo um modelo de barragem de terra homogênea.

Figura 1: Barragem de terra homogênea.



Fonte: Gomes e Teixeira (2017).

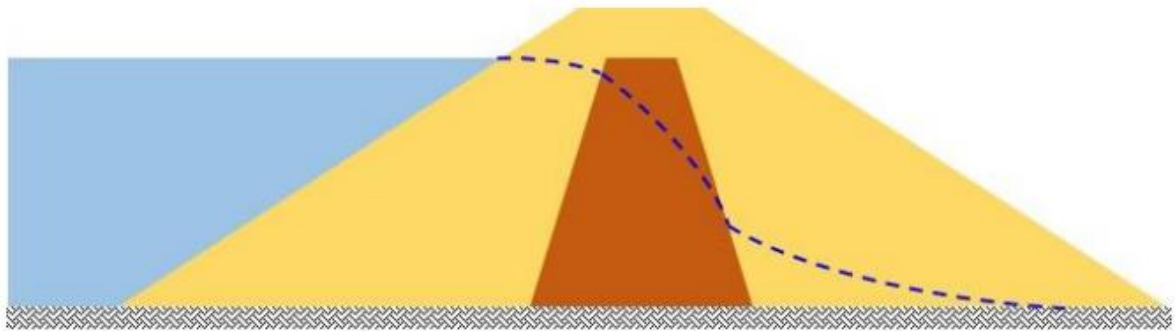
As barragens de terra zoneadas possuem em sua composição do maciço mais de um tipo de solo, sendo então utilizados diferentes tipos de materiais granulares para sua construção. A recomendação para a construção deste tipo de barragem de terra é quando haja insuficiência de um único tipo de material granular

adequado no local para a construção da barragem. Conforme a Agência Nacional das Águas (2013, p. 13-14):

Neste tipo de barragem os materiais mais permeáveis são lançados nas partes externas da seção transversal da barragem, sendo os menos permeáveis (material mais argiloso) lançados na parte central e/ou na parte de montante (ANA, 2013, p. 13-14).

Na Figura 2 é possível observar uma seção típica de barragem de terra zoneada com um núcleo central impermeável.

Figura 2: Barragem de terra zoneada com núcleo central impermeável.

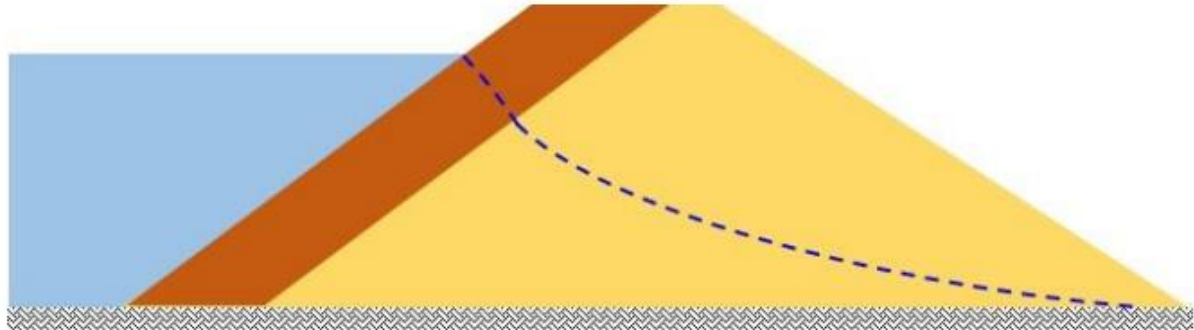


Fonte: Gomes e Teixeira (2017).

Ainda complementando os conceitos de barragens de terra zoneada, Gomes e Teixeira (2017) descrevem que elas são constituídas por um núcleo central impermeável, ou também constituídas por uma camada impermeável externa, em cima do talude de montante. Assim também, Massad (2010, p. 178) define que esses barramentos podem ser construídos “com um único solo de empréstimo, mas compactado em condições diferentes de umidade, o que confere ao solo características geotécnicas diferentes. [...]”.

Na Figura 3, observa-se um modelo de barragem de terra zoneada composta por uma faixa impermeável externa na parte superior do talude de montante.

Figura 3: Barragem de terra zoneada com camada impermeável sobre o talude de montante.



Fonte: Gomes e Teixeira (2017).

2.1.1 Elementos que constituem as barragens de terra

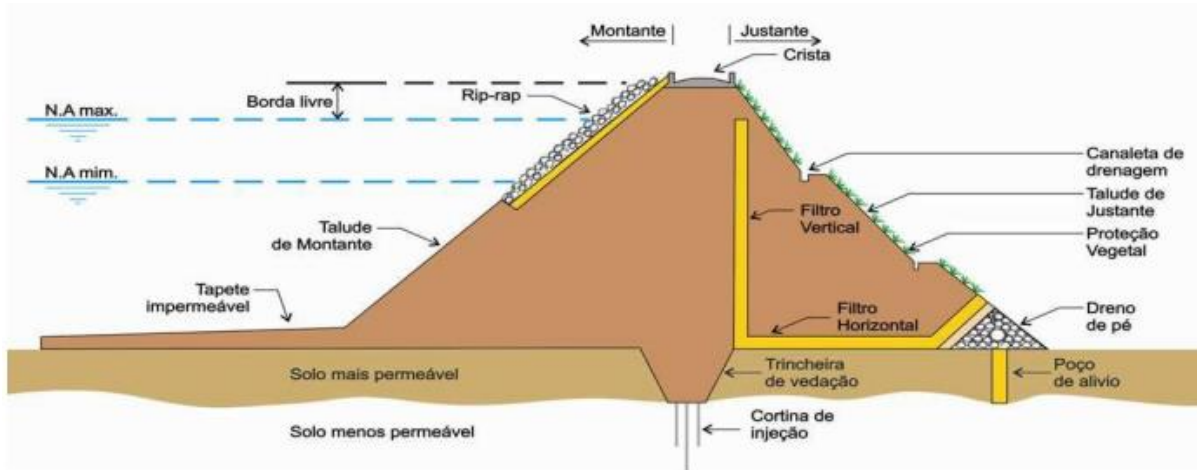
Conforme alguns autores pesquisados (Carvalho, 2011; ANA, 2013; Monteiro, 2018; Birck, 2016; Gomes e Teixeira, 2017; Barbosa, 2016; Cordeiro, 2017 dentre outros autores), as barragens de terra são constituídas por alguns elementos básicos e principais, os quais são essenciais para a constituição da estrutura, estabelecendo um funcionamento correto da barragem. Esses elementos são:

- **Crista:** A crista é a parte superior do barramento, conforme Monteiro (2018) ela geralmente é determinada levando em consideração a necessidade do tráfego de veículos nela. Com isso a largura da crista não deve ser inferior a 3 metros, sendo então a largura mínima tolerável da crista para contribuir com a segurança do maciço de terra, essa definição serve para barragens de terra de qualquer porte.
- **Borda livre:** A borda livre é a distância vertical que deve ser dada em relação ao nível de água máximo do reservatório com a altura da crista. Tendo como função fornecer segurança para o maciço contra possível transbordamento (Monteiro, 2018).
- **Talude de montante e de jusante:** No barramento, as faces laterais inclinadas são denominadas de taludes, paralelas ao eixo do aterro, sendo, talude de montante é o lado que fica em contato com a água (espaldar molhado) e talude de jusante (espaldar seco) é o lado de baixo (GOMES E TEIXEIRA, 2017).

- Proteções dos taludes: Os taludes de um barramento estão constantemente sujeitos a forças que comprometem a estabilidade da estrutura, como por exemplo a de enxurradas e ventos. No talude de montante há uma grande ocorrência de ondas resultantes da ação do vento e ao volume do reservatório, causando impactos no talude e trazendo riscos de erosões externa no barramento. Com isso, Monteiro (2018) explica que para proteção do talude de montante contra a erosão utiliza-se o *rip-rap*. Ainda também, “esta proteção, geralmente é feita com rochas com tamanho suficiente para não serem arrastadas pelas ondas, [...]. A proteção deve cobrir todo trecho do talude, [...]. (CARVALHO, 2011, p. 109)”. Já os taludes da jusante, o risco de erosão é causado por agentes meteorológicos, como por chuvas e ventos, então para isso, Barbosa (2016) diz que para ser feito a proteção do talude de jusante aplica-se uma camada de grama ou uma manta protetora.
- Trincheira de vedação (*cut-off*): As trincheiras de vedação são escavações realizadas no eixo do barramento, sendo preenchidas por um solo devidamente compactado. Assim, para Carvalho (2011) a escavação de trincheiras é a forma mais utilizada para interromper o fluxo de água que ocorre sob a fundação do barramento.
- Filtros: Os filtros tem por sua finalidade controlar e reduzir a quantidade da percolação no interior do barramento, reduzindo a linha de saturação para o talude de jusante e níveis de subpressões no interior da fundação. Conforme Massad (2010), interceptando o fluxo de água, afim de impedir a tendência de percolar em direção ao pé da jusante, pode-se conter a possibilidade de ocorrência do *pipping*, que nada mais é o fenômeno da areia movediça ou o levantamento do solo. O filtro vertical e o filtro horizontal devem ser constituídos de material mais poroso que o solo utilizado no barramento, ou seja, de uma granulometria maior, para que consiga drenar a linha freática com facilidade. O filtro vertical tem por sua finalidade drenar e reduzir a rede de fluxo do barramento, já o filtro horizontal recebe a água drenada pelo filtro vertical, encaminhando horizontalmente para o dreno de pé, conduzindo então esta água de forma segura para o rio.
- Sistema de drenagem das águas pluviais: Segundo Monteiro (2018) são “estruturas localizada na crista e nos taludes que coletam e transportam a água das chuvas, evitando a erosão dos mesmos”.

Na Figura 4 apresenta os respectivos elementos básicos e principais que constituem a estrutura de uma barragem de terra homogênea.

Figura 4: Barragem de terra homogênea e seus principais elementos.



Fonte: Carvalho (2011).

2.2 Patologias em taludes de montante e seus efeitos

As barragens de terra são importantes obras de engenharia, prezando a segurança como um principal pilar para sua operação e construção. Essa segurança deve ser levada com muita consideração e atenção em todos os projetos a serem realizados, pois uma obra de grande porte resulta também em grandes acidentes. De acordo com Massad (2010, p. 185):

A segurança da barragem é obviamente o princípio preponderante. Dela dependem vidas humanas, bens comunitários e individuais e deve ser garantida quanto:

- a) ao transbordamento, que pode abrir brechas no corpo de barragens de terra e de enrocamento;
- b) ao piping [...];
- c) à ruptura dos taludes artificiais, de montante e de jusante, e aos taludes naturais, das ombreiras adjacentes ao reservatório;
- d) ao efeito das ondas formadas pela ação dos ventos, atuantes na superfície dos reservatórios, e que vão se quebrar no talude de montante, podendo provocar sulcos de erosão;
- e) ao efeito erosivo das águas das chuvas sobre o talude de jusante (Massad, 2010, p. 185).

Em uma barragem de terra homogênea, o talude de montante é protegido por uma camada espessa de *rip-rap*, cuja função é proteger o talude contra possíveis

erosões decorrentes do impacto da ação das ondas e da variação do nível da água do reservatório e prevenindo a deterioração do maciço. Essa camada de *rip-rap*, também chamada de enrocamento, conforme ANA (2013, p. 73) é fundamentalmente constituída por duas camadas de materiais: interna(s) e externa, em que as descreve como:

- Camadas internas(s): filtro ou transição, formado por areias e pedregulhos de granulometrias controladas para prevenir a perda de solo do maciço através dos vazios do enrocamento;
- Camada externa: formada por pedras de tamanhos suficientes para não serem carreadas pelas ondas do reservatório, ou ocasionalmente escombros de concreto de construção e pavimentação de demolição. É usada para proteger o aterro da erosão, absorvendo-a, e para desviar o impacto de uma onda antes que ela atinja o solo compactado. O tamanho e a massa do material *rip-rap* absorvem a energia de impacto das ondas, enquanto que as lacunas entre as pedras retardam o fluxo de água, diminuindo sua capacidade de erosão do solo ou estruturas. A massa de *rip-rap* também oferece proteção contra danos causados por impactos de gelo ou detritos (ANA, 2013, p. 73).

Como referido anteriormente, a chuva é um dos fatores que ocasiona erosão no barramento, pois com seu impacto das gotas pluviais e enchimento do nível do reservatório, causando enxurradas, acaba que formando ravinamentos, e com isso causando a tendência de erosão.

A proteção do talude de montante, feito de enrocamento para diminuir os impactos de onda no reservatório, deve ser projetada de maneira que possua uma boa resistência, “[...] cujos blocos devem apresentar dimensões mínimas, suficiente para não serem arrastados pelas ondas” (CORDEIRO, 2017, p. 23).

Na Tabela 1, expõe recomendações para a espessura da camada de *rip-rap*, mínimas, em relação da altura máxima das ondas no reservatório.

Tabela 1: Espessura da camada de *rip-rap* em relação à altura máxima de ondas no reservatório.

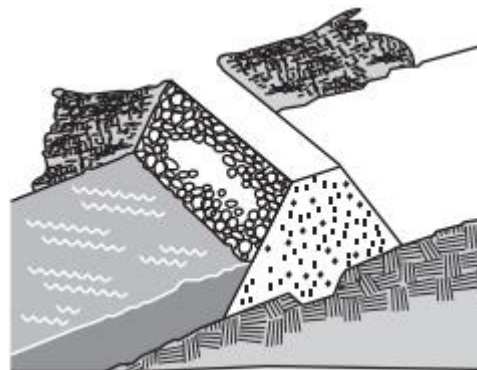
Altura máxima da onda (m)	Espessura da camada de <i>rip-rap</i> (m)
0,00 – 0,60	0,30
0,60 – 1,20	0,46
1,20 – 1,80	0,61
1,80 – 2,40	0,76
2,40 – 3,00	0,91

Fonte: Adaptado de Gaioto, 2003.

Nesta tabela, analisa-se que conforme a altura máxima da onda aumenta, a espessura de *rip-rap* também deve aumentar, para garantir a segurança no talude de montante contra o impacto das ondas, diminuindo o risco de erosão externa do talude.

Com o *rip-rap* mal dimensionado, o talude de montante torna-se desprotegido, contribuindo desta forma para que a ação das ondas do reservatório tenha uma tendência de deslocar o *rip-rap*, fazendo com que as pedras utilizadas no enrocamento comecem a desmoronar talude abaixo, reduzindo assim a largura do maciço da barragem. Na Figura 5, pode-se observar essa anomalia ocasionada por um *rip-rap* mal dimensionado.

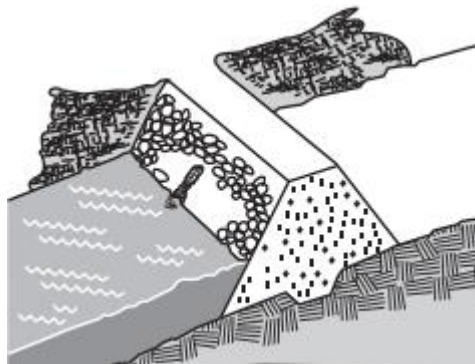
Figura 5: *Rip-rap* deslocado ou destruído.



Fonte: Ministério da Integração Nacional (2002).

A camada de *rip-rap* mal graduada, também pode gerar incidência de erosão, pois a presença de pedras com granulometrias similares presente ao corpo do enrocamento, acaba que permitindo a passagem das ondas entre elas e com isso acarretando em erosão de pedras e partículas de solo. Na Figura 6 observa-se esta anomalia causada por uma camada de *rip-rap* mal graduada.

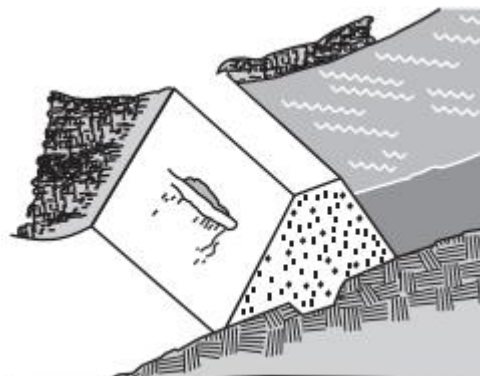
Figura 6: Erosão no talude de montante ocasionada por uma camada de *rip-rap* mal graduada.



Fonte: Ministério da Integração Nacional (2002).

A infiltração excessiva de água no interior do barramento e uma drenagem inadequada também pode comprometer a estrutura do maciço, ocasionando perda da resistência do barramento e conseqüentemente possíveis riscos de deslizamento, tendo origem pela crista ou pelo talude de montante. Na Figura 7 observa-se a ocorrência desta anomalia causada pela infiltração no interior do maciço, tendo como possível consequência um transbordamento ou uma ruptura na estrutura.

Figura 7: Deslizamento.



Fonte: Ministério da Integração Nacional (2002).

Conforme a Resolução nº 742, de 17 de outubro de 2011, da ANA, destaca a anomalia como sendo “qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou formação que possa vir a afetar a segurança da barragem, tanto a curto como a longo prazo”. Tendo em vista esse assunto referido, deve-se manter uma manutenção adequada incluindo medidas preventivas de rotina, para que se possa manter a segurança e proteger o barramento de possíveis acidentes.

2.3 Velocidade de ventos e seus efeitos a geração de ondas em reservatórios de barragens

Em um reservatório, a ação do vento é um dos principais fenômenos naturais que compromete o barramento. Dependendo da velocidade do vento, as ondas geradas acabam causando impacto da água no talude de montante, com isso sendo prejudicial para a estabilidade do maciço, originando uma possível patologia na estrutura do mesmo.

De acordo com ANA (2013, p. 35) “a proteção do talude de montante e a altura de segurança ou folga são diretamente influenciados pela ação das ondas, sendo necessário prever a intensidade e altura das ondas”. Para determinar a altura da onda em barragem de terra e de enrocamento, que possivelmente afetará na estabilidade do talude de montante, deve-se ter conhecimento da velocidade do vento predominante na região e, da extensão da superfície do reservatório (L), também conhecido como *fetch*. Com a velocidade do vento e o *fetch* do reservatório, calcula-se a altura de onda pela equação empírica de Stevenson, apresentada na Equação 1.

$$h_0 = 0,028 \sqrt{V \cdot L} + 0,76 - 0,26L^{0,25} \quad [1]$$

Em que:

h_0 = altura da onda (m);

V = velocidade do vento (km/h);

L = *fetch* (km).

A partir da altura da onda calculada, pode-se determinar a altura de segurança através da Equação 2, também conhecida na literatura como borda livre. Apresenta-se, a seguir, a Equação 2.

$$h = 1,4 \cdot h_0 \quad [2]$$

Em que:

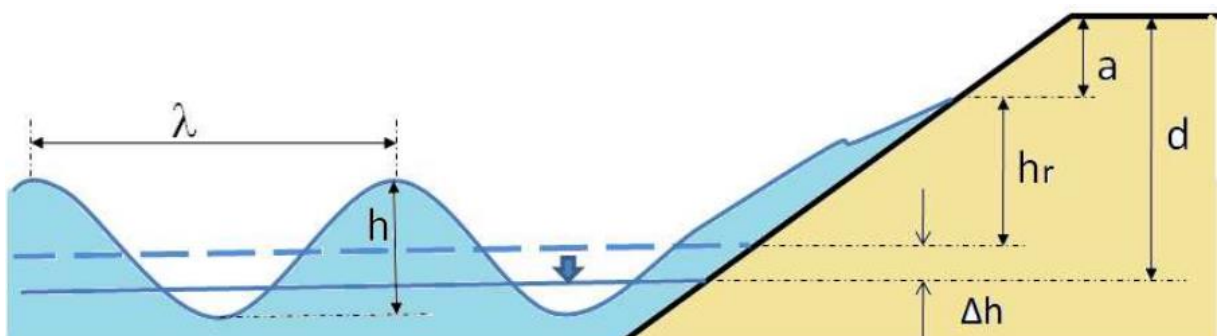
h = altura de segurança (m);

h_0 = altura da onda (m);

A altura de segurança, serve para proteger o barramento. Ela deve ser estimada corretamente para que o impacto da onda formada no reservatório não ultrapasse o maciço.

Na Figura 8 a seguir, observa-se uma imagem ilustrativa, demonstrando a altura e percurso da onda no interior do reservatório, e da maneira que ela gera o impacto no talude de montante, levando em consideração a borda livre estimada para esse possível impacto da onda.

Figura 8: Altura da borda livre e ondas na barragem.



Fonte: Sandoval (2016).

Na Figura 8, a borda livre é apresentada pela letra “d”, mostrando a importância de determinar ela de forma correta, para que a altura da onda representada pela letra “h” e, a altura da onda devido a velocidade ao impacto no talude de montante representada na figura por “hr”, não ultrapasse o topo do talude

de montante. Conforme ANA (2013), a borda livre máxima para barragem de terra e enrocamento deve ser limitada a 3,0 m.

Conforme referenciado, para determinação da altura da onda em barragem de terra, deve-se ter conhecimento da velocidade de vento predominante na região. Com isso, a Tabela 2 e Tabela 3, expõe as velocidades médias e máximas de ventos mensais do ano de 2012 à 2022 para o município de Alegrete, Rio grande do Sul. Em razão dessas médias serem mensais e, para ter uma noção das velocidades de vento em 10 anos de dados, foi coletado dados meteorológicos de 31/01/2012 à 31/10/2022 da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia do município de Alegrete. É importante destacar que os dados da velocidade dos ventos, para o ano de 2022, encontra-se em fase de registro.

Em alguns meses não teve registro de velocidades médias e máximas mensais do vento, com isso, na Tabela 2 e Tabela 3, esses meses que não obtiveram registro estão sendo representados com um hífen.

Tabela 2: Velocidades médias mensais do vento em 10 anos de coleta de dados.

Velocidades médias mensais do vento (m/s)											
Mês	Ano										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Janeiro	2,4	2,5	2,0	-	2,2	-	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1
Fevereiro	1,8	2,2	2,3	2,0	1,8	-	2,0	1,9	1,9	1,6	1,9
Março	1,6	2,1	1,8	2,0	2,1	-	1,9	1,8	1,9	1,7	1,8
Abril	1,6	1,8	2,0	1,8	2,2	1,9	1,6	-	1,8	2,0	1,8
Maio	1,5	1,7	1,6	1,8	2,0	2,0	1,9	1,9	1,6	1,5	1,6
Junho	1,4	1,8	2,2	1,7	1,5	1,8	1,5	1,5	2,2	1,7	-
Julho	1,8	1,7	1,8	1,9	1,9	-	2,1	1,6	1,9	1,5	-
Agosto	2,2	2,2	2,0	2,3	2,0	-	2,0	2,1	2,0	2,1	-
Setembro	2,5	2,3	2,7	2,5	2,2	2,4	2,5	2,3	2,4	2,5	2,1
Outubro	-	2,6	2,7	2,9	2,4	2,5	2,7	2,6	2,6	2,2	2,3
Novembro	2,7	-	2,2	2,7	2,2	2,1	2,2	2,4	2,6	2,2	
Dezembro	2,4	-	-	2,2	1,9	2,2	1,9	1,7	2,0	2,4	

Fonte: Adaptado de INMET, 2022.

Tabela 3: Velocidades máximas mensais do vento em 10 anos de coleta de dados.

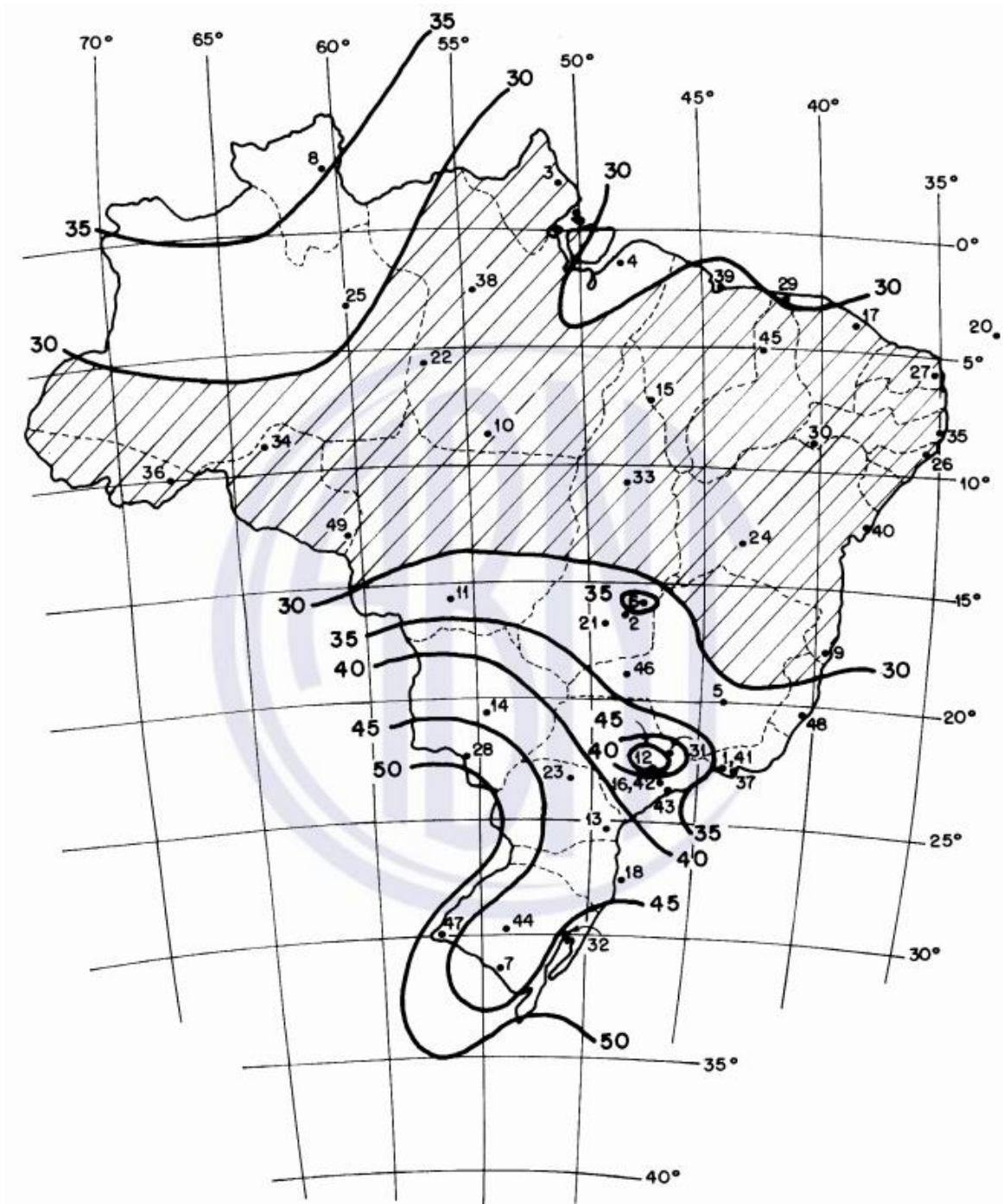
Velocidades máximas mensais do vento (m/s)											
Mês	Ano										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Janeiro	5,9	8	9,3	-	5,1	-	5,7	6,7	6	7,3	4,9
Fevereiro	5,4	7,5	8,1	5,2	5,5	-	6,9	5,4	6	5,7	5,2
Março	6,6	6	5,3	5,3	6,4	-	5,1	5,2	5,5	5,4	5,7
Abril	8	8,9	5,8	5,7	6,3	4,9	5,7	-	5,1	4,9	6,3
Mai	6,9	6,9	5,4	6,7	5,2	5,8	5,2	5,5	7	4,9	5,5
Junho	4,9	6,8	5,8	7,2	5,9	6	4,4	4,9	6	5,9	-
Julho	6,8	6,4	5,6	5,5	5,8	-	7,1	4,3	4,8	5,1	-
Agosto	6,4	7,1	5,3	6,3	7,7	-	6,2	6,7	5,8	6,6	-
Setembro	6,8	6,5	7,3	7,6	7,1	5,9	8,3	6,6	6,9	8	5,5
Outubro	-	7	8,9	7	7,7	11	7,1	9,6	8,2	6,8	7,2
Novembro	6,9	-	7,6	6,7	6,8	7,2	7	6,2	6,5	6,5	
Dezembro	7,6	-	-	7,5	5	6,7	6	6	5,2	5,7	

Fonte: Adaptado de INMET, 2022.

Em posse desses dados mostrados na Tabela 2 e Tabela 3, é possível calcular a altura de onda no reservatório, tendo em vista, que a velocidade máxima mensal do vento em um período de 10 anos de coleta de dados foi registrada no mês de outubro, no ano de 2017, sendo uma velocidade de 11 m/s.

Entretanto, de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 6123 (1988, p. 5) a velocidade básica do vento “é a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano”. Com isso, a Figura 9 mostra o gráfico das isopletas da velocidade básica do Brasil.

Figura 9: Gráfico das isopletas da velocidade básica do Brasil.



Fonte: Associação de Normas Técnicas (1988).

Conforme o gráfico das isopletas da velocidade básica do Brasil exposto, pode-se dizer que o município de Alegrete, situado no estado do Rio Grande do Sul, possui uma velocidade básica do vento de 45 m/s, ou seja, 162 km/h.

2.4 Uso de Geomembranas em barragens de terra

O uso de geossintéticos tem crescido muito nos últimos anos, onde podemos ver seu emprego em diversas aplicações, talvez por suas vantagens técnicas e econômicas com relação aos materiais convencionais, como por exemplo, a facilidade de instalação e menor tempo de execução das obras (Pierozan et al, 2015).

De acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR ISO 10318-1 (2021, p. 8) descreve a geomembrana como sendo “estrutura constituída de materiais geossintéticos, produzida industrialmente em forma de lâmina, na qual a função barreira é essencialmente desempenhada por polímeros”. Em vista disso, conforme Carvalho (2011) a geomembrana é um material geossintético com baixo índice de permeabilidade, que possui propriedades elástica e flexível. Ainda, Carvalho (2011, p. 23) relata que as geomembranas “servem para ser utilizada como revestimento impermeabilizante podendo ter diversas aplicações como impermeabilização, [...], reservatórios de água, [...]”.

No entanto, Pierozan et al (2015, p. 2-3) relata que atualmente:

[...] as geomembranas adquiriram uma nova forma de utilização, tendo sido aplicadas na construção de tapetes impermeáveis a montante de barragens de terra. Neste caso, basicamente, a geomembrana é empregada com a finalidade de formar uma barreira contra o fluxo d'água, em substituição à camada única de solo compactado (PIEROZAN; TEIXEIRA; ARAÚJO, 2015, p. 2-3).

A geomembrana, além de possuir a função de impermeabilizar o fluxo da água em um reservatório, também serve como barreira para gases ou vapores. Na Figura 10 observa-se a representação de uma geomembrana.

Figura 10: Geomembrana.



Fonte: Costa (2015).

Goméz (2014, p. 15) destaca que “no Brasil, as geomembranas mais utilizadas são as de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e PVC (Polivinil Clorado) por possuírem maior resistência química e, por apresentarem maior versatilidade”.

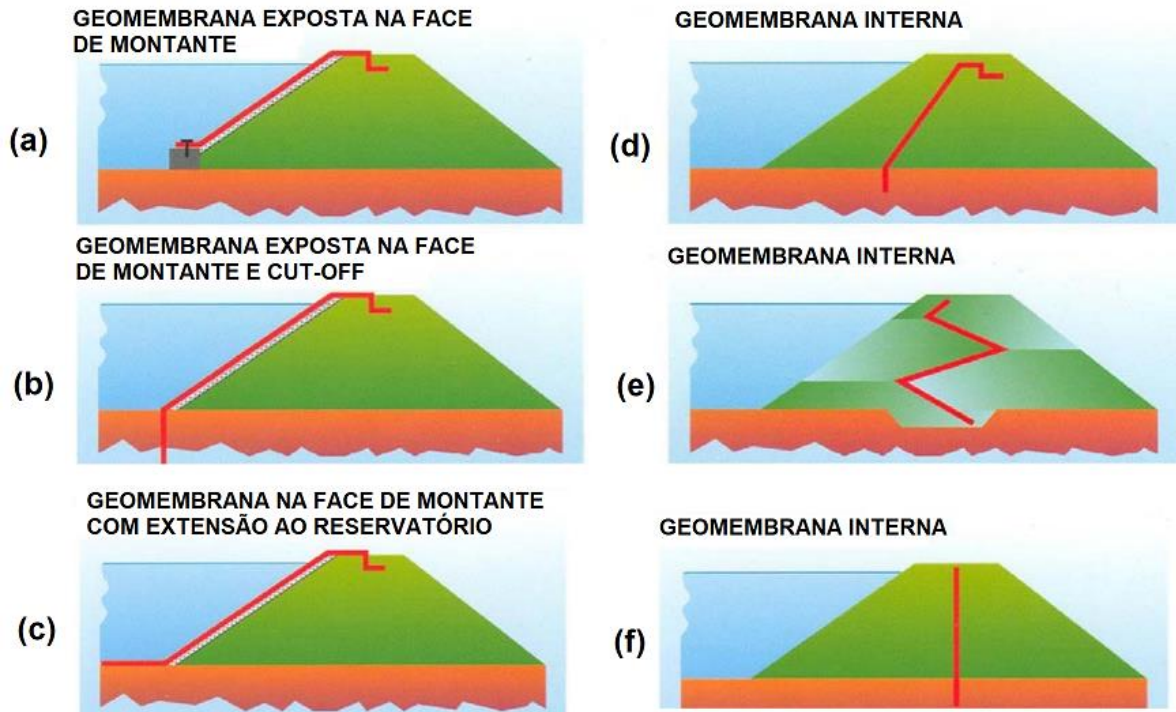
A geomembrana é aplicada em barragens de terra sob o talude de montante do barramento ou na parte central, servindo como uma face impermeabilizante. Nesta aplicação destaca-se a importância da ancoragem, quando a geomembrana não se mantém estável devido ao atrito entre os materiais da interface, a geomembrana deve ser ancorada para prevenir deslizamentos e tensões. A ancoragem geralmente é feita na crista e ao pé do talude de montante, ou também podendo ser inserido um trecho do geossintético horizontalmente para dentro do barramento (COLMANETTI, 2006).

No caso do talude de montante sob proteção de *rip-rap* (Figura 11a, Figura 11b e Figura 11c), Colmanetti (2006) relata que a geomembrana minimiza a presença de água no corpo de barragem, reduzindo o deslocamento de finos, aumento da poropressão e erosões internas.

No esquema de aplicação central da geomembrana no barramento (Figura 11d, Figura 11e e Figura 11f), a pressão da água procede até a parte central onde a geomembrana opera, impermeabilizando o fluxo de água, com isso o talude de jusante torna-se responsável pela estabilidade do maciço (COLMANETTI, 2006). Para essa alternativa de aplicação, é necessitada uma menor quantidade de geomembrana e havendo a possibilidade de ser instalada sem proteção.

Na Figura 11, ilustra diferentes opções na aplicação da geomembrana em uma barragem de terra, seja sobre a face de montante ou na parte central do barramento.

Figura 11: Diferentes opções de aplicação da geomembrana em barragem de terra.



Fonte: Adaptado de Colmanetti, 2006.

Com finalidade de proteger o talude de montante, a geomembrana fornece segurança para a barragem de terra quanto a infiltração de água e, ao tratar de revestimento do talude, ela também protege contra possíveis riscos de erosão.

Conforme pesquisas bibliográficas, na Tabela 4 mostra-se diferentes aplicações e estudos de caso com o uso de geomembrana em barragens de terra.

A espessura de geomembrana que não obteve valor, está sendo representado com um hífen.

Tabela 4: Diferentes aplicações e estudos com a geomembrana.

Autor (s)	Tipo de Geomembrana (GM)	Espessura (mm)	Estudo de caso
Colmanetti, Janaina P. (2006)	PVC-P	2	Estudo sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento.
Gómez, Carolina R. (2014)	PVC e PEAD	1 e 2	Análise de danos em geomembranas por meio de ensaios de laboratório em diferentes escalas.
Mikos, Ana P. (2014)	PEAD	-	Uso de geomembranas em barragens de terra - estudo de percolação em modelo reduzido e numérico.
Araújo, Isis M. (2021)	PEAD	2	Análise da aplicação de materiais geossintéticos em fundações de barragens de terra.
Pierozan, Rodrigo C. (2014)	PEAD	1,5	Aplicação de geomembranas em tapetes impermeáveis a montante de barragens de terra.
Sanfona, Pedro Miguel G.S.S (2018)	PVC	1,5; 2 e 3	Aplicação de Geomembranas de PVC em Barragens: Influência da Temperatura no Controle das Soldaduras.
R.C. Pierozan, S.H.C. Teixeira, G.L.S. Araújo, C.A. Teixeira (2019)	PEAD	1,5	Geomembrana como Manta Impermeável a Montante de Barragens de Aterro - Laboratório e Estudo Numérico

Fonte: Autor, 2023.

Conforme mostrado na Tabela 4, Colmanetti (2006) utilizou a geomembrana PVC-P (Policloreto de Vinila com Plastificante) para determinar a previsão de tempo de vida da GM e índices, principalmente o índice de plasticidade e resistência ao rasgo. Já Gómez (2014) utilizou dois tipos de geomembrana, uma PVC e a outra PEAD, para estudar o dano mecânico devido à aplicação de pressão em um sistema constituído de material granular/geomembrana, por meio de ensaios de laboratórios de compressão, para tanto foram empregados dois equipamentos (um de pequena e outro de média escala). Mikos (2014) avaliou o comportamento do fluxo em

barragens de terra realizando ensaios em modelo reduzido, com aplicação de geomembrana de PEAD em tratamentos constituídas de materiais de alta permeabilidade, avaliando a redução das vazões de percolação e poropressão. Já Araújo (2021), também utilizou a geomembrana de PEAD, porém para analisar como tapete à montante, sendo essa geomembrana com espessura de 2 mm e com comprimentos variáveis, afim de encontrar o comprimento que forneça maior viabilidade com reduções de vazões mais significativas.

Utilizando uma geomembrana PEAD de 1,5 mm de espessura, Pierozan (2014) avaliou o desempenho do tratamento de fundação de barragens de terra com o emprego de geomembrana, sendo o mesmo caracterizado em termos de redução de vazões, de pressões neutras e de gradientes hidráulicos.

Sanfona (2018), utilizou uma geomembrana de PVC com três diferentes espessuras, sendo de 1,5 mm, 2 mm e de 3 mm, afim de avaliar a influência da temperatura na força de arranque das soldaduras de geomembranas de PVC.

Em um artigo publicado por Pierozan et al (2014), foi apresentado uma pesquisa cujo objetivo principal foi avaliar a eficiência do tratamento de barragens de aterro por impermeabilização a montante, sendo utilizado uma geomembrana PEAD de 1,5 mm de espessura para impermeabilização.

2.4.1 Outros geossintéticos complementares ao uso de geomembranas

A NBR ISO 10318-1 (2021) também classifica e define outros tipos de geossintéticos, tais como os geotêxteis. Barbosa (2016, p. 34) os descreve como sendo “produtos têxteis e permeáveis, com boa capacidade de infiltração, que têm propriedades hidráulicas e mecânicas que permitem seu bom desempenho em diversas obras geotécnicas”. O geotêxtil, material plano e polimérico, pode ser classificado como: não tecido, tricotado ou tecido.

O geotêxtil não tecido, possui fibras, filamentos ou outros elementos em sua composição, interligados por processos mecânicos (NBR ISO 10318-1, 2021). Na Figura 12 expõe uma imagem do geotêxtil não tecido.

Figura 12: Geotêxtil não tecido.



Fonte: BIDIM (2022).

De acordo com BIDIM (2022) “os sistemas de subdrenagem são compostos por um meio filtrante que se encarrega de permitir a passagem de água e reter o solo, e um meio drenante encarregado de captar e conduzir a água [...]”, com isso, o geotêxtil não tecido torna-se um sistema de subdrenagem, cumprindo com a função de filtrar, enquanto o material granular faz a drenagem e evacuação da água. Em barragens de terra temos essa aplicação para os filtros drenantes, Barbosa (2016) relata que em relação à filtração e drenagem, existem casos de geossintéticos aplicados nos drenos de pé e tapetes drenantes.

2.5 Modelos reduzidos de barragens de terra

Na literatura, existem alguns trabalhos que se referem à análises e obtenções de resultados em modelos físicos reduzidos de barragens de terra, apresentando uma boa similaridade e confiabilidade em comparação com modelo em escala real.

O trabalho do autor Melo (2011, p. 1) descreve que:

O comportamento de uma estrutura (real ou reduzida) pode ser quantificado através de grandezas físicas, entre os quais podemos mencionar: deslocamentos, deformações lineares, rotações, tensões, etc. Essas grandezas físicas podem ser obtidas teoricamente ou através de ensaios experimentais baseados no desenvolvimento de modelos. Assim, o modelo pode ser definido como a representação ou interpretação simplificada da realidade, ou uma interpretação de um fragmento de um sistema [...] (MELO, 2011, p. 1).

Com isso, a execução de um determinado estudo em um modelo reduzido, também serve para analisar fenômenos físicos em uma escala reduzida, facilitando assim na compreensão de um determinado conceito.

Ainda, conforme Melo (2011, p. 2) “Os modelos físicos tem a vantagem sobre os modelos matemáticos, de não apresentarem uma discretização do problema, pois esse é contínuo e pode ter uma representação geométrica tridimensional [...]”.

De acordo com Unas (2010, p. 63) “O tanque de percolação, equipamento laboratorial de caráter didático, permite o estudo da percolação em modelo reduzido de escoamentos bidimensionais [...]”.

Marques e Ferreira (2009) elaboraram um protótipo experimental para aplicar conceitos de percolação em modelo reduzido, com finalidade de facilitar a compreensão dos estudantes em relação ao aprendizado destes conceitos, trazendo um aspecto mais intuitivo por se tratar da visualização do processo em tempo real.

Com o objetivo de avaliar a utilização de geomembrana como camada de proteção em fundações permeáveis, Pierozan (2014) realizou um experimento simulando um fluxo de água em um modelo reduzido de barragem de terra. A escala geométrica adotada para a construção do modelo físico reduzido foi de 1:100, ou seja, a cada 1 m na escala real representa 1 cm no modelo reduzido.

Pierozan (2014) visando adequar aos requisitos da sua pesquisa fez uma adaptação do tanque de percolação utilizado por Araujo (2013). O tanque possui 250 cm de comprimento, 60 cm de altura e 45 cm de largura, além de ser constituída de uma face lateral de acrílico, permitindo a visualização do efeito do fluxo no modelo físico reduzido. Neste estudo, Pierozan (2014) instalou uma saída de água na parte lateral do tanque, possuindo mais ou menos 10 cm de altura, a qual permitiu o escoamento da água captada através do sistema de drenagem do modelo reduzido de barragem de terra. Para evitar o entupimento da saída de água por carregamento de materiais finos, foi necessário proteger esta saída com geotêxtil não-tecido. Ainda, Pierozan (2014) relata que para a construção do modelo físico reduzido da

barragem de terra no tanque de percolação, utilizou-se areia fina, aplicando a técnica da chuva de areia, que nada mais é, que a deposição do material granular com uma altura de queda constante, para que o material fique uniformemente distribuído, de forma homogênea. Também, de forma a orientar no momento da construção do modelo reduzido, foi desenhado as dimensões do barramento no acrílico. A inclinação dos taludes de montante e jusante foram de 1V:2H, ou seja, a cada 1 centímetro na vertical será 2 cm na horizontal. Neste caso o autor adotou uma crista da barragem em modelo reduzido de 6 cm de largura, a altura da barragem (H) de 24 cm e espessura da fundação (t) sendo de 12 cm ($t = H/2$).

Na Figura 13 observa-se como exemplo o modelo físico reduzido da barragem de terra realizada pelo Pierozan (2014) após a conclusão de todas as etapas de montagem.

Figura 13: Exemplo de modelo físico reduzido de barragem de terra.



Fonte: Pierozan, 2014.

Vale ressaltar, que no experimento desenvolvido pelo autor Pierozan (2014) também foi construído um tapete horizontal e um filtro vertical no barramento, utilizando um geotêxtil sobre o material de fundação, para que mantenha o material da fundação e o material granular (utilizado no tapete horizontal) separados. Na construção do filtro vertical foi utilizado pequenas hastes de madeira, para ter rigidez, facilitando na construção.

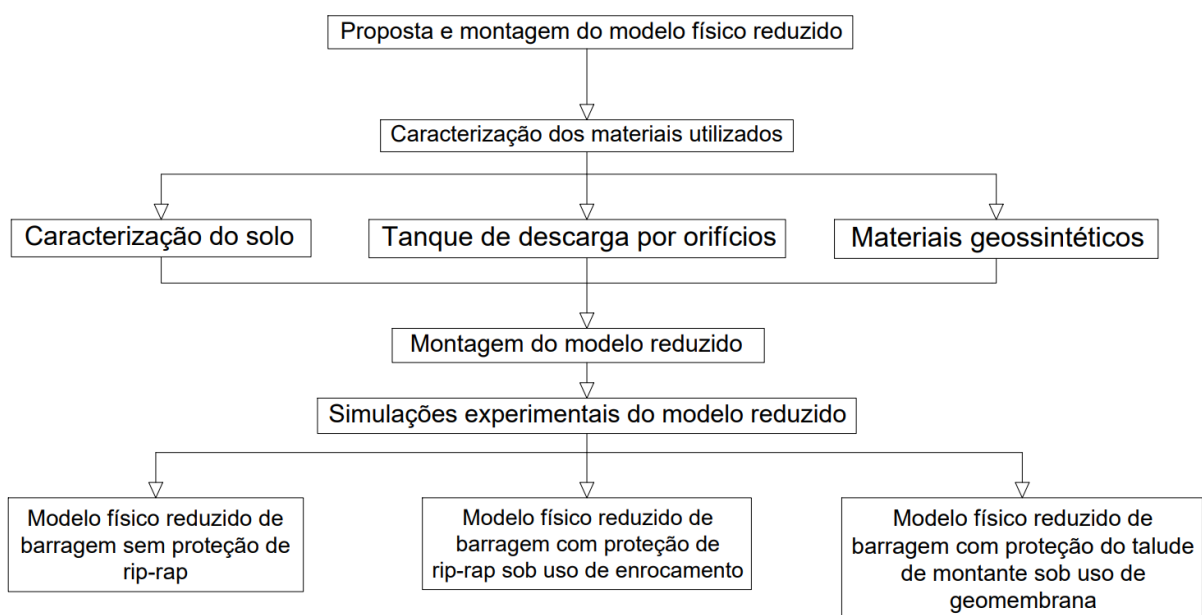
Conforme Pierozan (2014, p. 91) “O enchimento do reservatório foi feito com o auxílio de uma mangueira, sendo a vazão d’água mantida constante e controlada para não ocasionar instabilidade nos taludes da barragem”. Ao chegar na estabilização do fluxo de água desejada, o nível de água do reservatório foi mantido constante.

Araujo (2013) em sua pesquisa, também adotou o uso de um modelo reduzido de barragem, pretendendo simular o comportamento do fluxo da água no maciço da barragem, com sistema de drenagem interna.

3 METODOLOGIA

Tendo em vista a proposta de executar um modelo físico reduzido de uma barragem de terra homogênea para avaliar o uso de geomembrana como proteção do talude de montante, destaca-se na Figura 14 o gabarito da metodologia aplicada por meio de um fluxograma.

Figura 14: Fluxograma da proposta de trabalho.



Fonte: Autor, 2023.

Pode-se observar no fluxograma, inicialmente, a proposta da pesquisa realizada. Em seguida, a partir da definição do objetivo do trabalho, foram abordados: a identificação e a caracterização dos materiais e equipamentos utilizados para a confecção do modelo reduzido, tais como: a caracterização do solo, detalhes e adaptações do tanque de percolação onde foi executado o modelo reduzido, detalhes e caracterização da geomembrana utilizada.

Após a realização da identificação e caracterização dos materiais utilizados, realizou-se a montagem e a caracterização do modelo físico reduzido utilizando os materiais estudados. Seguidamente, definido o modelo reduzido com os detalhes, foram avaliadas três situações de barragem de terra; sendo a primeira situação a barragem sem tratamento de *rip-rap*, na segunda envolve a barragem com tratamento de *rip-rap* utilizando enrocamento e, na terceira e última situação, sendo

uma simulação do modelo físico reduzido de barragem com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana.

Posteriormente, realizou-se, conforme consta no fluxograma, uma análise comparativa entre os três tratamentos utilizados no modelo reduzido.

3.1 Proposta e montagem do modelo reduzido

Neste trabalho, foi avaliado o uso da geomembrana como proteção do talude de montante em barragem de terra homogênea.

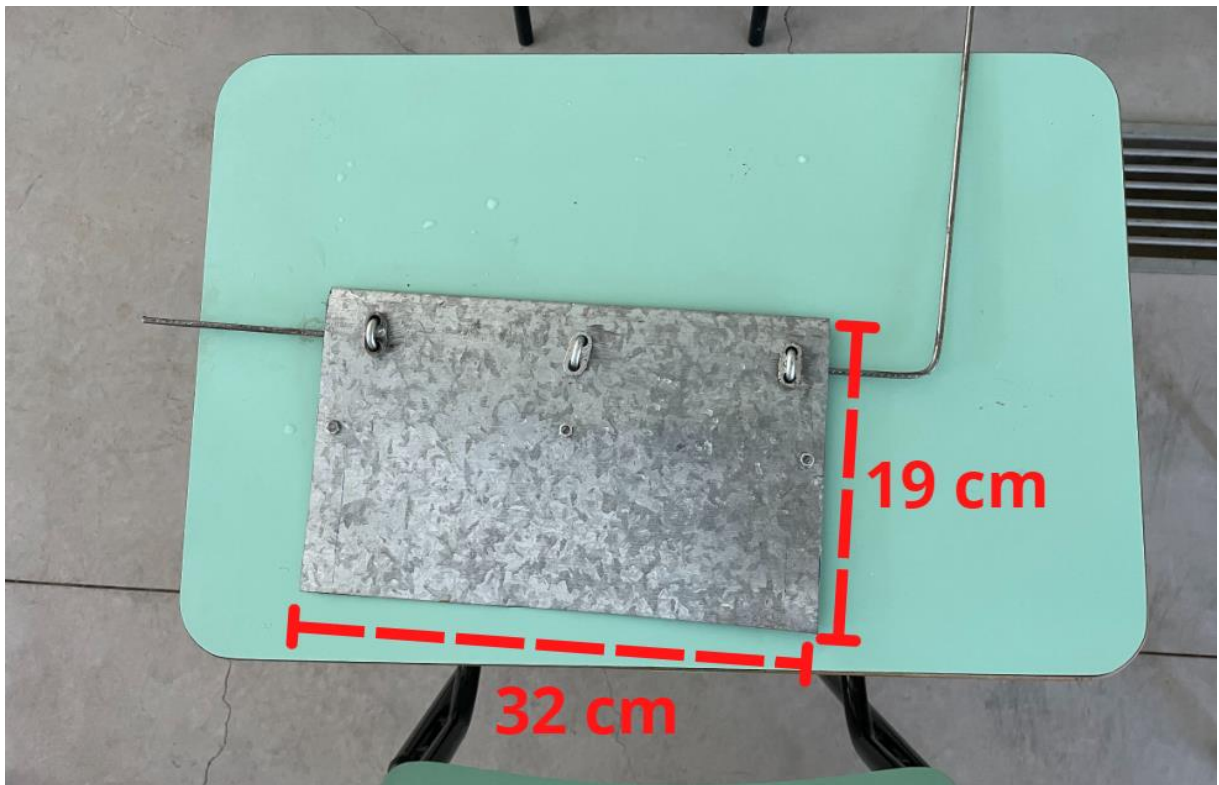
Com base nos trabalhos publicados pelos autores já citados anteriormente (Araujo, 2013; Ferreira, 2008; Marques e Ferreira, 2009; Mikos, 2014; Pierozan, 2014; Unas, 2010), para este estudo, foi realizado um experimento em modelo físico reduzido de barragem de terra, objetivando uma visualização realística dos efeitos que nelas ocorrem em escala real, sob ação dos impactos de ondas.

Para a simulação de ondas no reservatório, as mesmas foram geradas com a utilização de um dispositivo manual. De modo que as ondas são formadas com determinada frequência e altura. Dessa forma, objetiva-se obter um resultado mais fiel ao fenômeno quando ocorrido naturalmente, em decorrência da ação dos ventos. Com isso, foi analisado a erosão e degradação do material granular do talude de montante, devido ao impacto das ondas.

O dispositivo manual de geração de ondas, foi projetado e construído utilizando uma chapa metálica e vergalhão CA-60 4,2 mm, de 19 cm de altura e 32 cm de comprimento.

A Figura 15, apresenta o dispositivo manual construído para gerar a onda no reservatório.

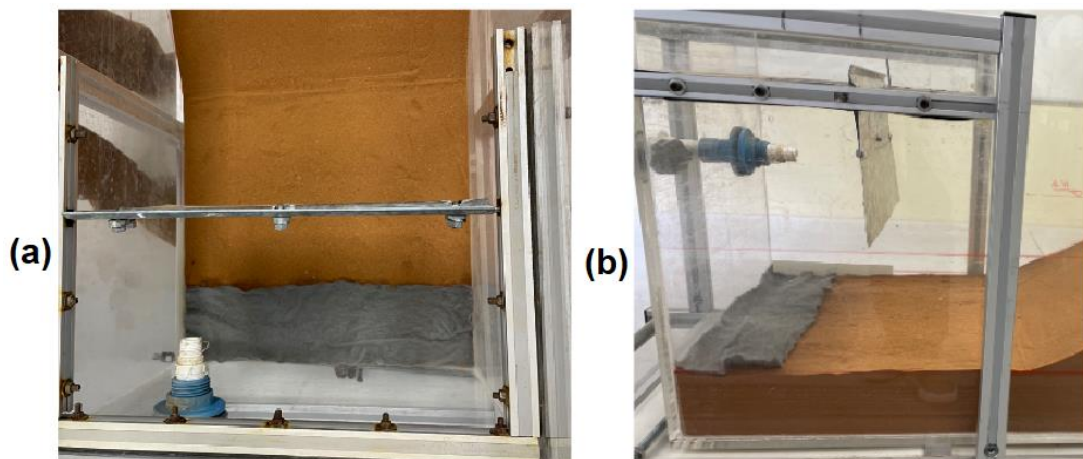
Figura 15: Dimensões do dispositivo manual para gerar ondas.



Fonte: Autor, 2023.

Após a construção do dispositivo manual para gerar as ondas, o mesmo foi instalado no tanque, como mostra a Figura 16, próximo a entrada de água no reservatório (Figura 16a e Figura 16b).

Figura 16: Dispositivo manual para gerar ondas instalado no tanque.



Fonte: Autor, 2023.

No intuito de dar mais respaldo às pesquisas bibliográficas sobre velocidade dos ventos para o município de Alegrete, foi realizado um registro de alturas de ondas a partir de informação verbal disponibilizadas por seis proprietários rurais que possuem barragem de terra. Dessa forma, foram coletados dados de alturas de onda e frequências do vento, em momentos de temporais ou ventos fortes.

3.2 Caracterização dos materiais utilizados

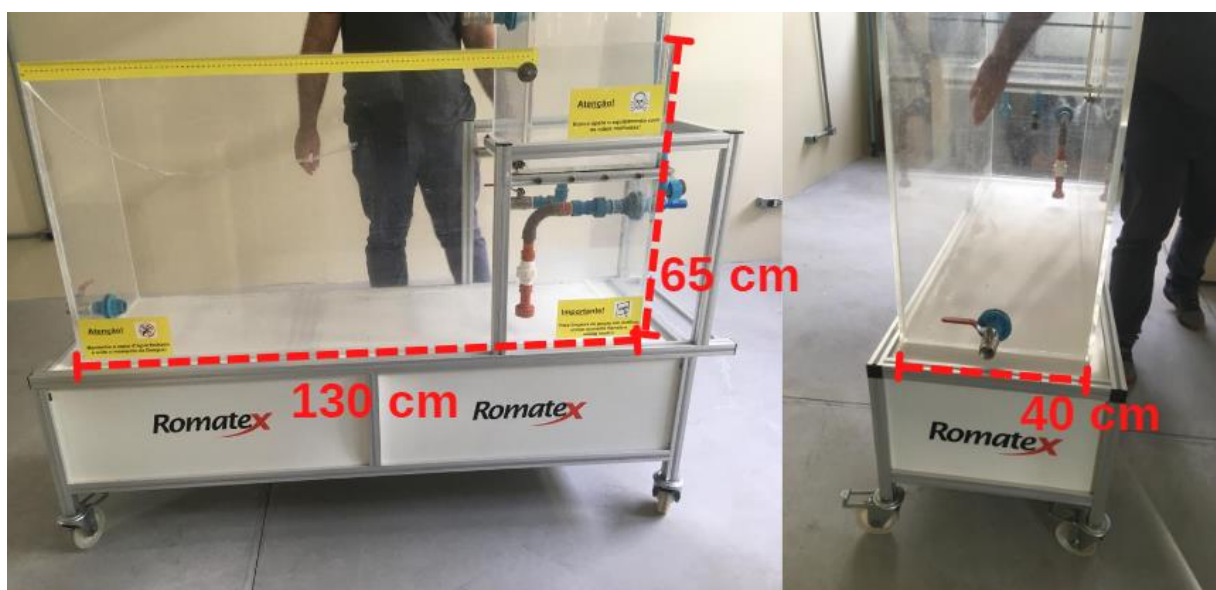
3.2.1 Tanque de descarga por orifícios

Para a construção da barragem de terra em modelo físico reduzido, foi utilizado e adaptado o tanque de descarga por orifícios da marca Romatex, o qual encontra-se no laboratório de hidráulica do Campus de Alegrete, em domínio da Universidade Federal do Pampa.

O tanque de descarga por orifícios utilizado, possui um comprimento de 130 cm, com uma altura de 65 cm e largura de 40 cm.

A Figura 17 mostra o tanque de descarga por orifícios com suas respectivas dimensões.

Figura 17: Tanque de descarga por orifícios e suas respectivas dimensões.



Fonte: Autor, 2023.

A adaptação do tanque consistiu em retirar a coluna de acrílico dele, para facilitar o uso interno, possibilitando a montagem do barramento e melhor monitoramento e execução dos ensaios.

3.2.2 Caracterização do solo

Para a montagem do modelo reduzido, foi utilizada uma areia, a qual serviu para a modelagem e composição do maciço da barragem de seção homogênea. A escolha deste solo granular se justifica pela praticidade na sua trabalhabilidade, além de guardar relação com os materiais sugeridos e usados pelos autores pesquisados (Araujo, 2013; Ferreira, 2008; Marques e Ferreira, 2009; Mikos, 2014; Pierozan, 2014; Unas, 2010).

O local de coleta da areia está situado no Sudoeste do Rio Grande do Sul, em uma área de arenização do subdistrito do Durasnal, localizado no município de Alegrete, nas coordenadas $29^{\circ}54'44.6''\text{S}$ e $55^{\circ}29'11.1''\text{O}$.

Na Figura 18, é exposta a vista aérea do local de coleta da areia eólica, obtido por imagens de satélite.

Figura 18: Vista aérea da local de coleta da areia.



Fonte: Campagnolo, 2022.

A Figura 19, apresenta uma vista panorâmica da área de coleta da areia eólica.

Figura 19: Vista panorâmica da área de coleta da areia.



Fonte: Autor, 2023.

Campagnolo (2022), em seu trabalho, teve como objetivo “[...] estudar a melhoria geotécnica de um solo eólico sob adição de cimento e sílica da casca de arroz (SCA), visando a confecção de tijolos maciços”. Com isso, a coleta do solo eólico, utilizado no trabalho dela, tem o mesmo local de origem onde foi coletado o solo granular para o presente trabalho. A escolha desse local se dá pela disponibilidade de areia e, também por sua localização ser próxima ao município, onde situa-se a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

No laboratório de solos e pavimentação da UNIPAMPA, Campagnolo (2022) realizou ensaios de caracterização geotécnica para o solo eólico da área de coleta. Os ensaios de caracterização geotécnica executados pela autora consistiram de:

análise granulométrica através do método de peneiramento; limite de liquidez pelo método de Casagrande; limite de plasticidade e; ensaios de massa específica dos grãos, pelo método do picnômetro.

Na Tabela 5, mostra os resultados dos ensaios de caracterização para o solo granular.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de caracterização do solo eólico.

Propriedades	Solo eólico estudado
Localização	Alegrete/RS
Coeficiente de uniformidade (Cu)	2,67
Coeficiente de curvatura (Cc)	1,04
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,38
Limite de Liquidez (%)	0
Limite de Plasticidade (%)	0
<i>pH</i>	4,5
Classificação SUCS	SP
Classificação TRB	A-3

Fonte: Adaptado de Campagnolo, 2022.

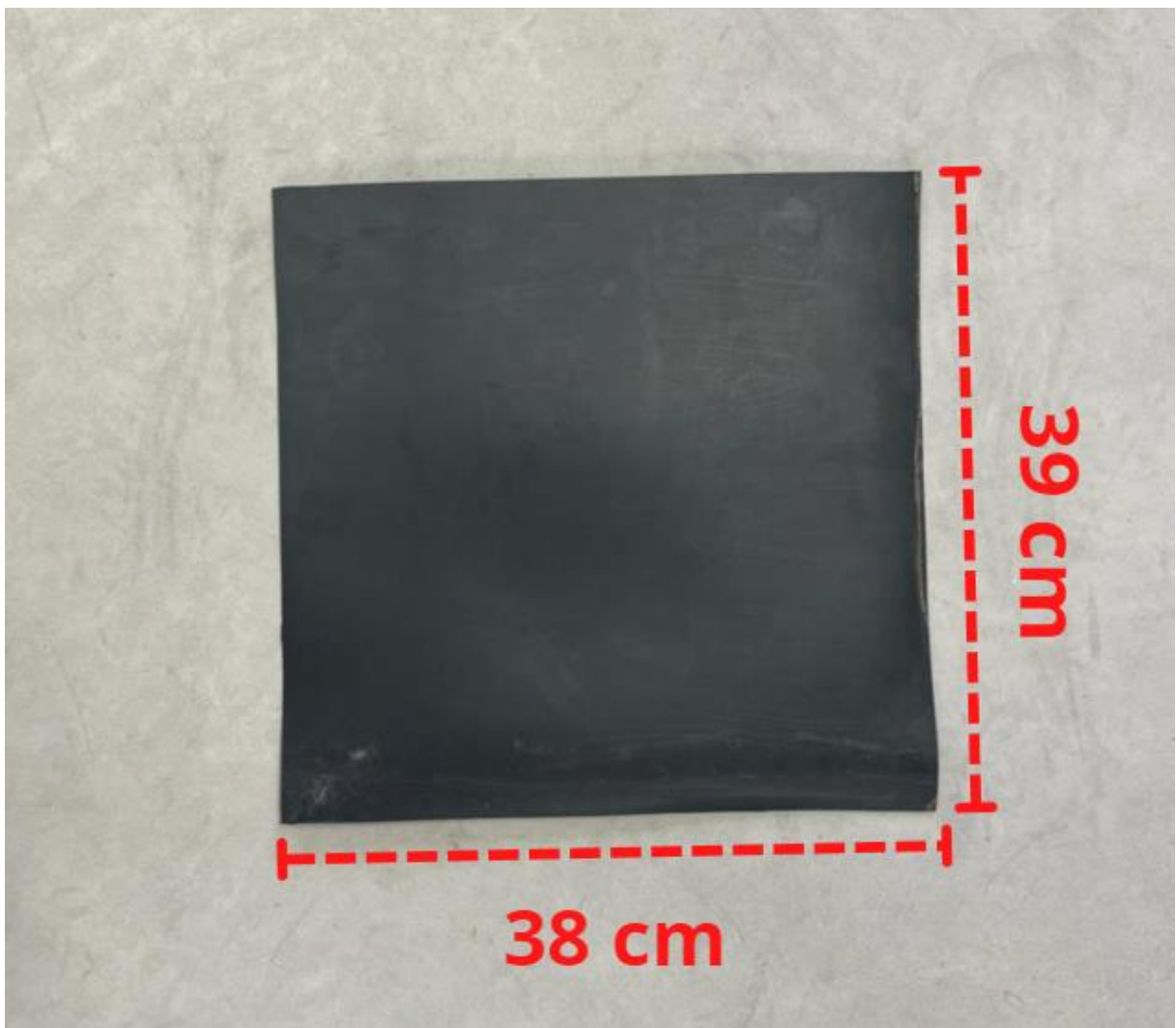
De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do solo eólico, Campagnolo (2022, p. 44) relata que “Pela classificação do Sistema Unificado – SUCS, o mesmo foi classificado como areia mal graduada (SP). Para a classificação TRB, o solo eólico foi classificado como A-3, [...]”.

3.2.3 Materiais geossintéticos

Com base nas pesquisas bibliográficas apresentadas na Tabela 2, em que foi analisado diferentes aplicações de geomembrana em barragem de terra, adquiriu-se a geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com 1,5 mm de espessura, sendo utilizada na terceira simulação realizada no modelo reduzido. A escolha dessa geomembrana foi dada em relação à suas características, por se tratar de um material maleável e de espessura fina, facilitando assim o manuseio e instalação no barramento em escala reduzida.

A Figura 20, mostra o corte realizado em 1 m² da geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com 1,5 mm de espessura. As dimensões do corte na geomembrana foram de 39x38 cm. O pedaço cortado foi colocado no talude de montante, servindo como proteção.

Figura 20: Corte realizado na geomembrana de PEAD.



Fonte: Autor, 2023.

Na montagem do modelo reduzido também foi utilizado um geotêxtil não tecido, para composição dos filtros vertical e horizontal. O geotêxtil foi aplicado com o intuito de trabalhar como material de transição, separando o solo granular grosso que constitui o filtro, do solo de areia fina que constitui o maciço do barramento.

Para aplicar o geotêxtil não tecido no barramento, foi realizado um corte no geotêxtil de 40 cm de largura, para facilitar no momento de elaborar o filtro.

Enquanto que a Figura 21, mostra como foi realizado o corte no geotêxtil, já com as dimensões projetadas sobre o mesmo.

Figura 21: Corte realizado no geotêxtil não tecido.



Fonte: Autor, 2023.

3.3 Montagem do modelo reduzido

Para a montagem do modelo físico reduzido de barragem de terra foram realizadas pesquisas bibliográficas (Araujo, 2013; Mikos, 2014; Pierozan, 2014; Unas, 2010), de modo que, contribuíssem para a elaboração da seção do barramento.

A proposta da seção do barramento levou em consideração as dimensões do tanque de descarga por orifício adaptado. Dessa forma foi possível a montagem do modelo no interior do tanque, na parte frontal, permitindo uma ampla visualização do

fluxo da água no interior da barragem e, efeitos erosivos que possam ocorrer no talude de montante.

O modelo reduzido do barramento compreende uma seção homogênea, composto por areia, construído na escala 1:100 e, a inclinação dos taludes do barramento de 1V:2H, ou seja, a cada 1 centímetro na vertical será 2 cm na horizontal.

Na Tabela 6 são apresentadas as propriedades e dimensões da seção transversal do modelo físico reduzido.

Tabela 6: Dimensões do modelo físico reduzido.

Propriedade	Descrição
Inclinação dos taludes (jusante e montante)	1V:2H
Escala do modelo reduzido	1:100
Altura (H)	17 cm
Largura da crista	6,5 cm
Base da barragem	74,5 cm
Espessura da fundação (t)	8,5 cm
Nível da água	14,5 cm
Borda livre	2,5 cm

Fonte: Autor, 2023.

A largura da crista do barramento (Tabela 6) foi determinada através da Equação 3, de Bureau of Reclamation (2002), em que o mesmo recomenda que, para barragens de terra, a largura mínima da crista por questão de segurança deve ser calculada pela seguinte fórmula:

$$L = \frac{Z}{5} + 3$$

[3]

Em que:

L = largura mínima da crista (m);

Z = altura máxima da barragem (m).

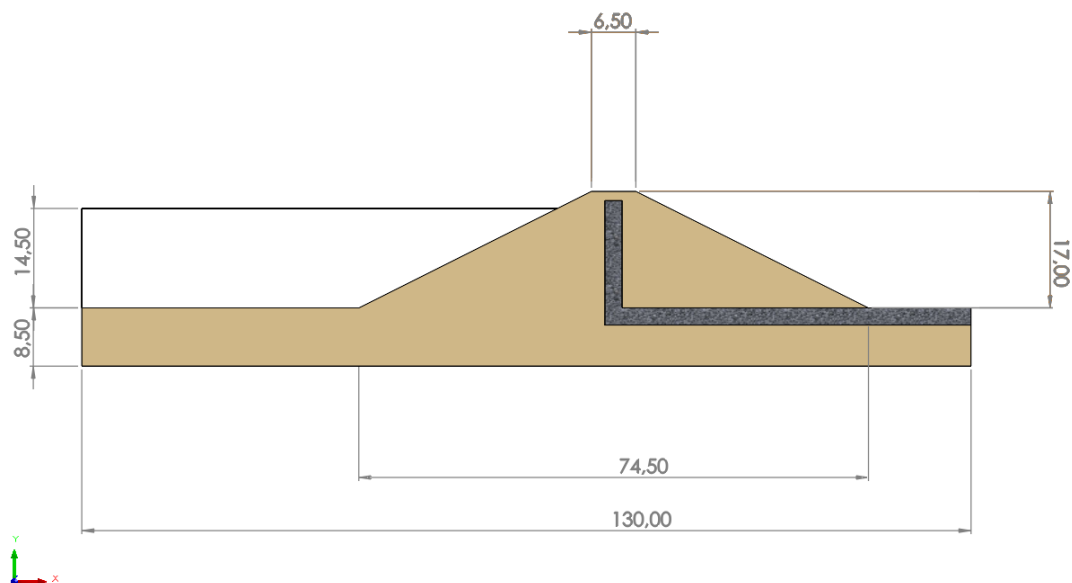
Foi adotado uma espessura da fundação da barragem de 8,5 cm, devido a proposta de Pierozan (2014), onde o autor utilizou a espessura da fundação sendo a metade da altura do barramento.

Já a altura da lâmina da água, foi determinada em relação ao que Gaioto (2003) propõe: que a borda livre no barramento não seja inferior a 0,5 metro. Sob essa informação, projetou-se para a seção do barramento uma altura de lâmina da água de 14,5 cm e, sendo a altura do barramento de 17 cm, a altura de folga livre corresponderá a 2,5 cm.

Para o dimensionamento do filtro composto (horizontal e vertical) no barramento, foram consideradas às dimensões da escala do modelo reduzido, a trabalhabilidade dos materiais, além de considerar as orientações de alguns autores (Mikos, 2014; Pierozan, 2014; Unas, 2010). Dessa forma, o filtro composto teve uma espessura de 2,5 cm e constituído de material brita 0.

O filtro vertical possui uma altura de 14,7 cm, estando o seu topo acima do nível da água do reservatório.

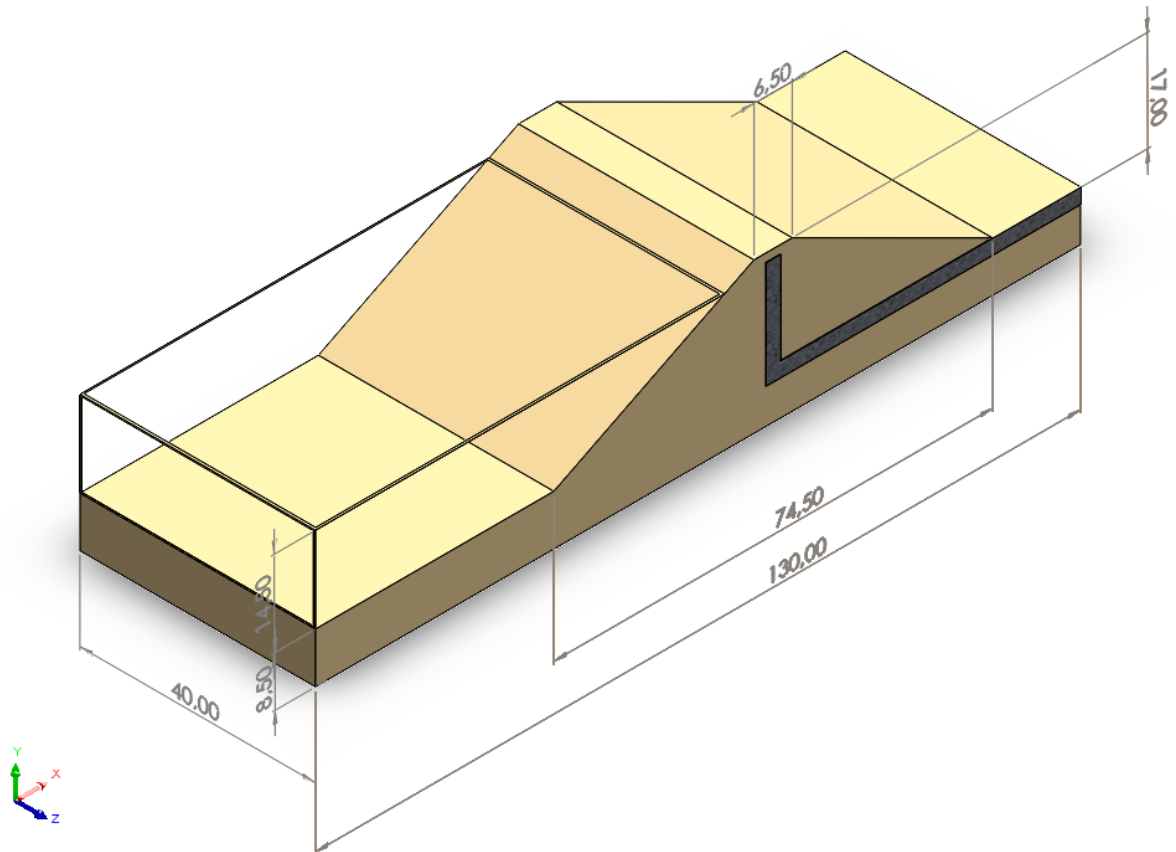
Na Figura 22, expõe-se um esboço elaborado da vista frontal com as dimensões do modelo reduzido da barragem de terra.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 23, observa-se a vista isométrica do esboço em 3D, elaborado do modelo reduzido de barragem de terra.

Figura 23: Vista isométrica do esboço 3D do modelo reduzido de barragem de terra.



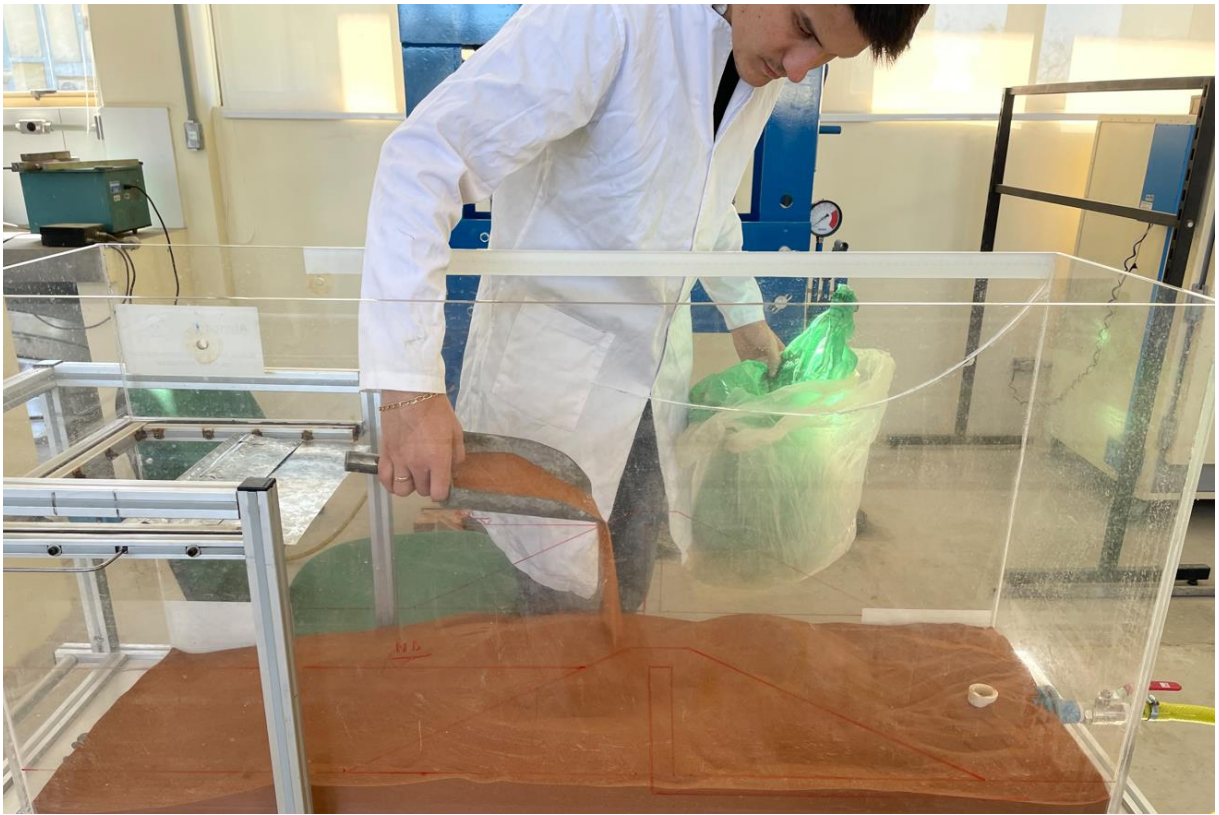
Fonte: Autor, 2023.

Após realizado o esboço 3D do modelo físico reduzido da barragem de terra, a sua montagem foi iniciada. Para facilitar a montagem, a barragem foi desenhada nas paredes do tanque de acrílico, utilizando uma régua para traçar as dimensões.

Com base nos autores pesquisados (Araújo, 2013; Mikos, 2014; Pierozan, 2014), a disposição do material granular para formar o barramento foi realizada através do método chuva de areia, utilizando uma concha com uma altura de queda constante de 20 cm, a fim de ter uma distribuição uniforme da areia na montagem do modelo reduzido.

Na Figura 24, consta como foi realizada a disposição do material granular, seguindo o método chuva de areia.

Figura 24: Disposição do material granular no barramento.

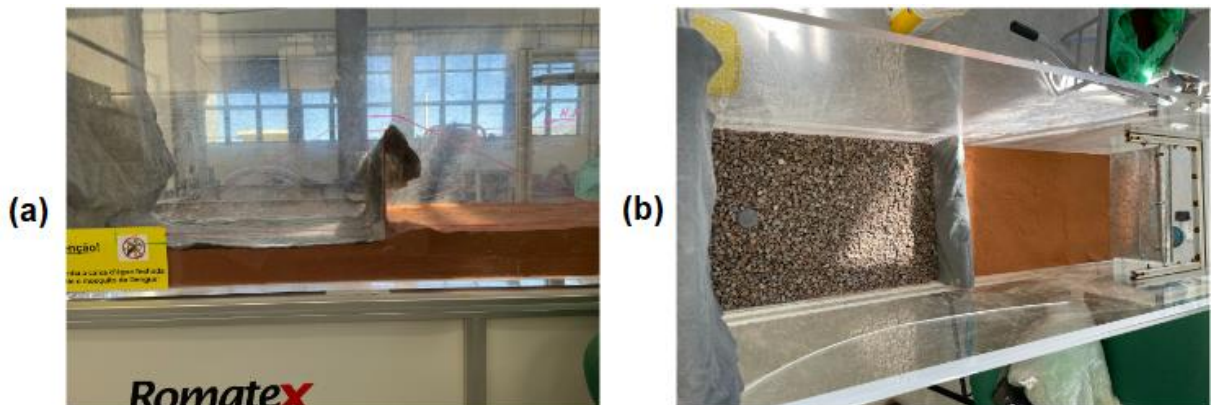


Fonte: Autor, 2023.

Após a deposição da areia na fundação, foi realizado a montagem do filtro vertical e horizontal, colocando o geotêxtil sob a fundação, como material de transição e, logo, colocando as britas 0 (tamanho de 4,8 mm a 9,5 mm), para composição dos filtros (Figura 25a e Figura 25b). Para vedar as laterais do filtro composto, foi utilizado uma fita adesiva transparente, para colar o geotêxtil na parede de acrílico.

A Figura 25, apresenta a montagem do filtro vertical e horizontal no modelo reduzido de barragem de terra.

Figura 25: Montagem do filtro vertical e horizontal.

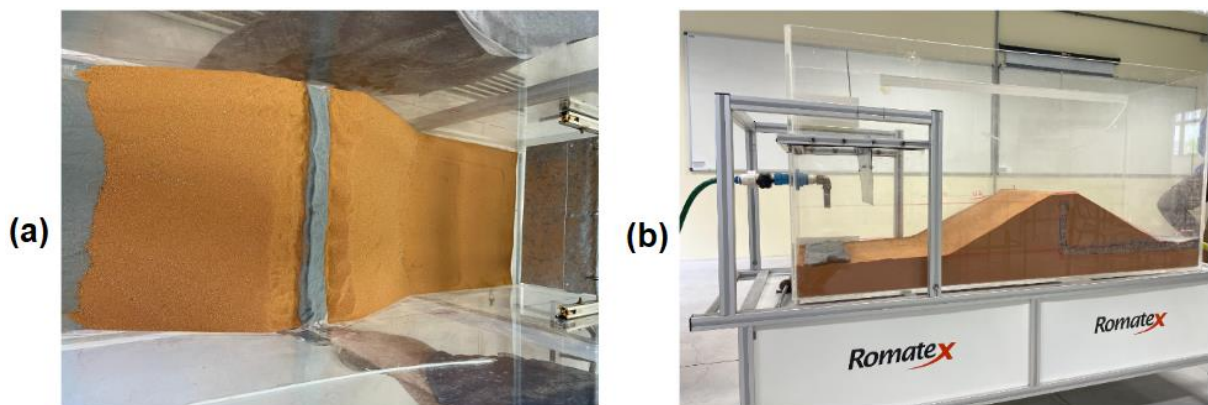


Fonte: Autor, 2023.

Com o filtro horizontal montado, a montagem do filtro vertical foi executada em paralelo com a deposição da areia que compõe o maciço do barramento, em forma de camadas (Figura 26a e Figura 26b).

Observa-se na Figura 26, a finalização da montagem do modelo reduzido da barragem de terra.

Figura 26: Montagem do modelo reduzido da barragem de terra.



Fonte: Autor, 2023.

Com a elaboração do modelo físico reduzido de barragem de terra, realizou-se três situações de simulações experimentais, sendo elas: modelo físico reduzido de barragem sem proteção de *rip-rap*, modelo físico reduzido de barragem com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento e, modelo físico reduzido de barragem com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana. É importante

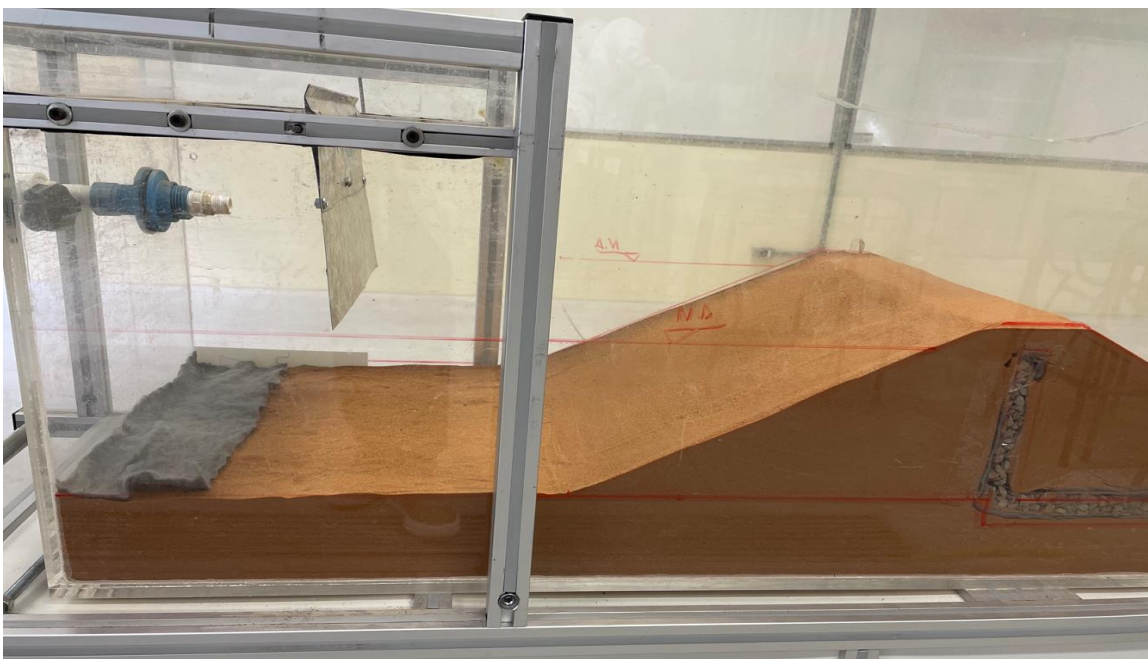
ressaltar, que para cada simulação experimental, a areia utilizada para o protótipo, e a brita 0 utilizada para os filtros, foram secadas na estufa a 105 °C, levando 24 horas para retirar os materiais, e o modelo reduzido da barragem de terra para cada simulação foi montado novamente. O intervalo de tempo para cada montagem foi de uma semana, dessa forma, levando sete dias para realização da próxima simulação. As simulações experimentais realizadas não tiveram repetições, essa hipótese fica como sugestão para futuros trabalhos.

As simulações realizadas no modelo reduzido visam compreender e analisar o processo de degradação e, de erosão no talude de montante, devido ao impacto das ondas e da infiltração do fluxo de água. Isso com o intuito de conhecer as possíveis patologias decorrentes a esses fenômenos, tais como ocorrência de erosão e/ou algum outro fenômeno patológico.

Para a primeira simulação foi montado o modelo físico reduzido de barragem de terra, cujas dimensões já foram apresentadas anteriormente, porém, neste ensaio, não foi utilizado a proteção de *rip-rap*.

A Figura 27, apresenta o modelo reduzido de barragem de terra sem proteção de *rip-rap*.

Figura 27: Modelo reduzido de barragem de terra de terra sem proteção de *rip-rap*.



Na segunda simulação, o modelo reduzido de barragem de terra possuiu enrocamento como proteção do talude de montante. O enrocamento foi realizado com material granular, brita número 1 (tamanho de 9,5 mm a 19 mm), o qual simularia a espessura real dos enrocamentos em escala real (de 0,5 a 1 m de espessura).

A Figura 28, mostra o modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento.

Figura 28: Modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento.



Fonte: Autor, 2023.

A partir desta simulação, foi colocada na parte frontal do tanque de acrílico uma fita métrica de 150 cm ao longo do comprimento e, uma régua de 30 cm, posicionada desde o nível da fundação até o vértice da crista com o talude de

montante, possibilitando assim uma melhor visualização dos efeitos de degradação e erosão no talude de montante.

A Figura 29, apresenta o modelo reduzido de barragem de terra com a fita métrica e a régua sobre a parte frontal do tanque de acrílico.

Figura 29: Modelo reduzido de barragem de terra com fita métrica e régua na parte frontal do tanque de acrílico.



Fonte: Autor, 2023.

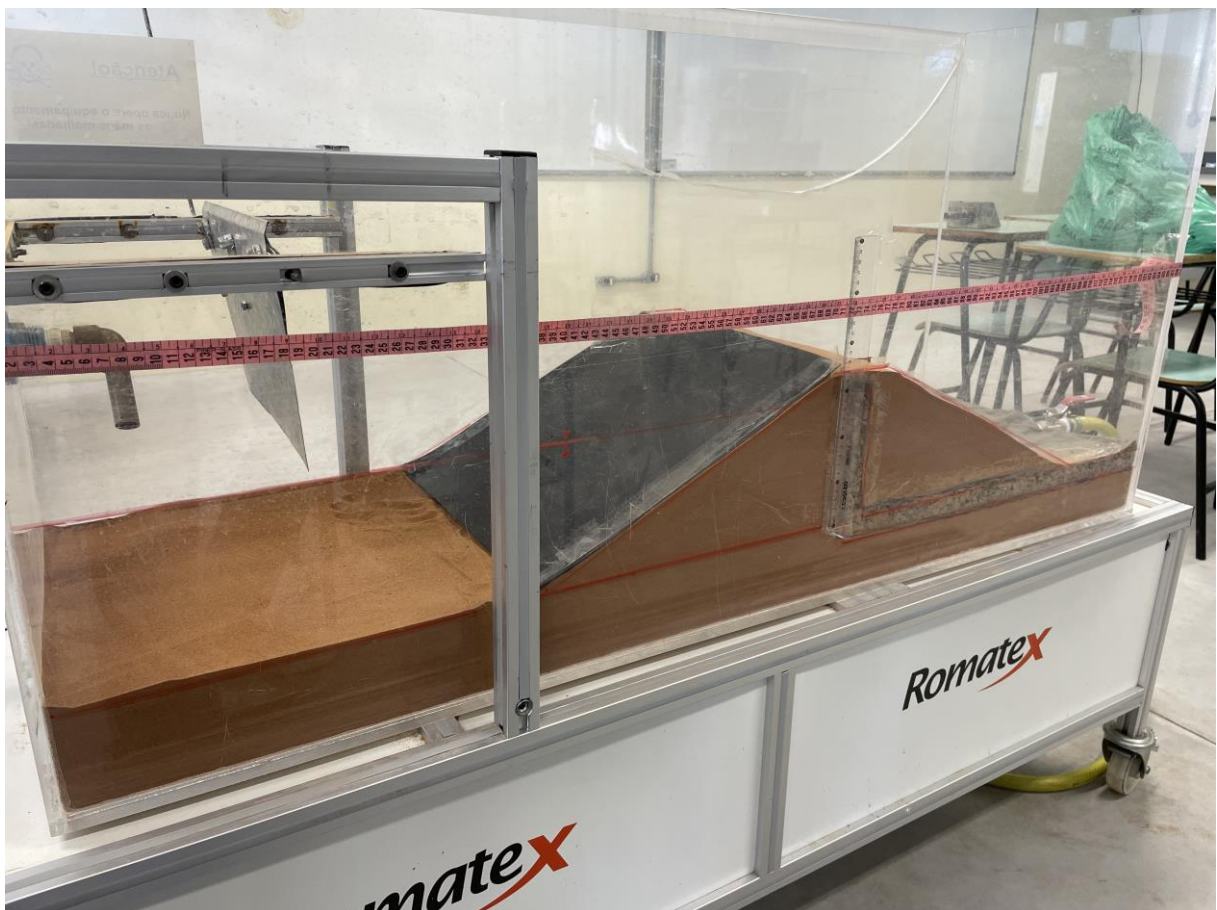
Como observa-se na Figura 29, no talude de montante também foi realizado um corte na seção, para que seja depositada as britas que formam o *rip-rap* sob uso de enrocamento.

A espessura do *rip-rap* sob uso de enrocamento foi determinada com a relação da altura máxima de onda a ser calculada no reservatório. Conforme visto anteriormente na Tabela 1, os valores de espessuras do *rip-rap* variam de 0,30 a 0,91 metros, para uma altura máxima de onda de 0,60 a 3,00 metros.

A terceira simulação, foi aplicada a geomembrana como proteção no talude de montante da barragem. A geomembrana utilizada é de Polietileno de Alta Densidade - PEAD, de 1,5 mm de espessura. A sua escolha foi devido ao fato de possuir propriedades que a tornam estável no talude, permitindo uma facilidade na aplicação e bom desempenho na operação. A geomembrana foi aplicada até o pé do talude de montante, utilizando uma fita adesiva transparente para vedar a geomembrana com as paredes do tanque de acrílico.

A Figura 30 apresenta o modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana.

Figura 30: Modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana.



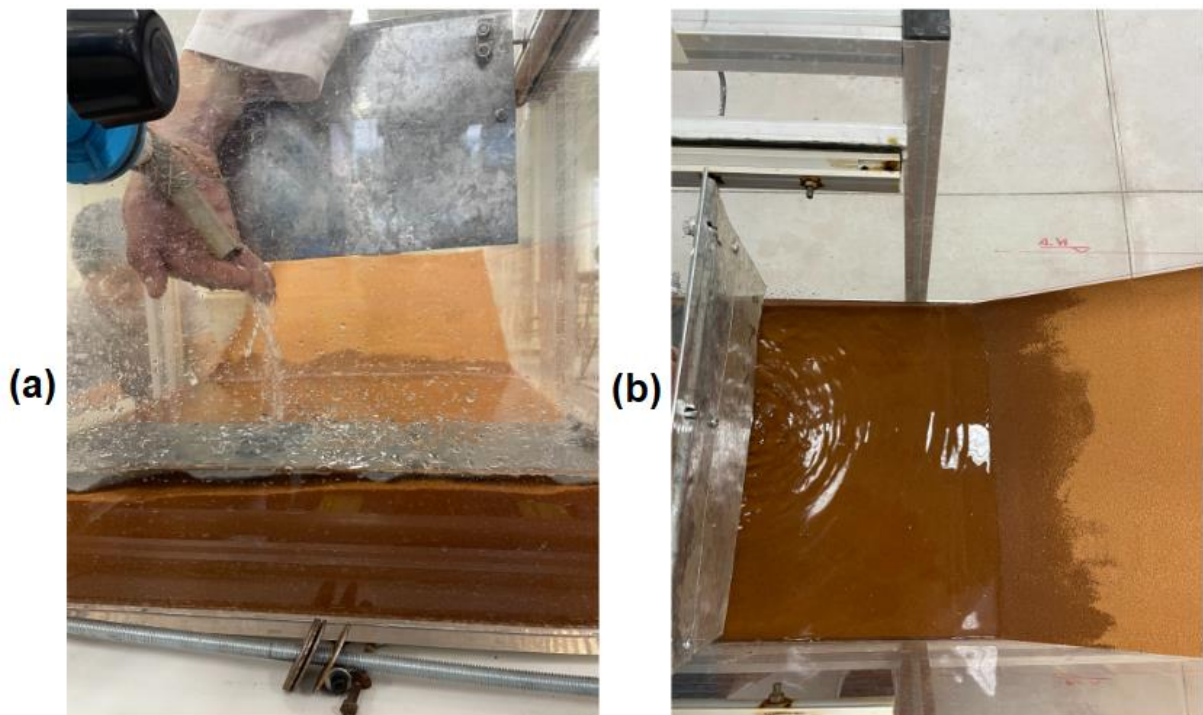
Fonte: Autor, 2023.

Com a montagem do modelo reduzido da barragem de terra, os experimentos tiveram início enchendo de água o reservatório, com uma vazão de entrada

controlada (Figura 31a e Figura 31b). A entrada de água no reservatório foi feita através de um registro posicionado na parte lateral do tanque, onde foi acoplado uma mangueira.

Nos primeiros instantes, para evitar a erosão na fundação causada pelo impacto da queda da água, foi colocado a mão e um pedaço de geotêxtil sobre a fundação, para quebrar o impacto da água, como mostra a Figura 31.

Figura 31: Enchimento do reservatório controlando a vazão de entrada.



Fonte: Autor, 2023.

O conduto de saída de água do sistema foi realizado utilizando um tubo, localizado na parte lateral traseira do tanque de acrílico. Esse tubo teve que ser adaptado colocando um joelho de PVC, para aumentar sua altura, ficando no mesmo nível da fundação.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Altura máxima da onda

Para determinar a altura máxima da onda no modelo físico reduzido de barragem de terra, temos que ter conhecimento da velocidade do vento predominante na região. Conforme os dados de velocidades do vento registrados pela estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia do município de Alegrete, expostos na Tabela 2 e Tabela 3, a velocidade máxima mensal do vento em um período de 10 anos de coleta de dados foi de 11m/s, ou seja, 39,6 km/h. Assim como, de acordo com a pesquisa verbal realizada com seis proprietários de barragens de terra, a altura de onda média foi de 51,6 cm. Também foi constatado que em momentos de ventos fortes ou tormentas, a frequência dos ventos que ocasionam as ondas no reservatório é de aproximadamente 30 minutos.

A Tabela 7 apresenta a referência verbal, realizada com proprietários de barragem de terra.

Tabela 7: Pesquisa verbal com proprietários de barragens de terra.

Referência Verbal		
Proprietários	Altura da onda (cm)	Frequência dos ventos
Proprietário 1	40 a 50	30 minutos
Proprietário 2	45	Contínua
Proprietário 3	50	20 a 30 minutos
Proprietário 4	50 a 60	Contínua
Proprietário 5	60	30 minutos
Proprietário 6	55	20 minutos

Fonte: Autor, 2023.

Porém, em construções de barragens de terra, deve-se sempre usar valores máximos de velocidade do vento em cálculos, para garantir a segurança da obra. Com isso, será utilizado a velocidade básica do vento de 45 m/s, ou seja, 162 km/h,

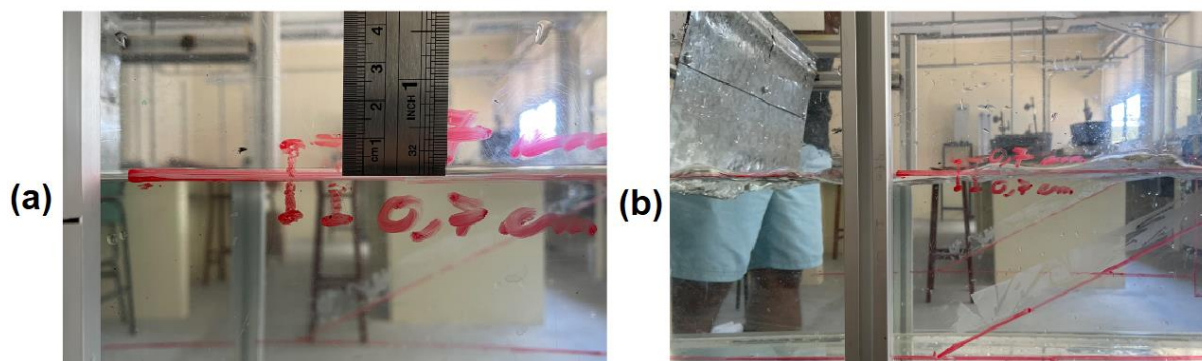
para cálculo da altura da onda, dada pelo mapa das isopletas, seguindo a Norma Brasileira ABNT NBR 6123.

Utilizando a Equação 1 empírica de Stevenson, exposta na Subseção 2.3, calcula-se a altura de onda, onde o *fetch* no modelo reduzido é de 69,5 cm, convertendo em quilômetros para a escala 1:100, temos um *fetch* de 0,0695 km. Com a velocidade básica do vento de 162 km/h para o município de Alegrete, situado no estado do Rio Grande do Sul, calculou-se uma altura de onda de 0,72 m, para a escala 1:100 utilizada, a altura de onda fica sendo de 7,20 mm.

Utilizando o dispositivo manual de gerador de ondas, foram realizados testes para chegar à altura de onda desejada de 7,20 mm. Esses testes resumem-se em desenhar a amplitude de 7,20 mm, utilizando uma régua (Figura 32a e Figura 32b) e, com o tanque contendo água até o nível determinado para o modelo reduzido de barragem de terra, realizou-se diferentes velocidades de movimento, afim de chegar na altura de onda projetada. Com os testes realizados, para chegar à altura de onda desejada foi deixado 2 cm do dispositivo imerso na água.

Na Figura 32, observa-se o teste realizado para gerar a onda de 7,20 mm.

Figura 32: Teste realizado para gerar a onda de 7,20 mm.



Fonte: Autor, 2023.

Portanto, para cada simulação realizada no modelo reduzido de barragem de terra, foram geradas ondas de 7,20 mm, através de um dispositivo manual. Com as ondas sendo geradas, foi realizado 30 minutos de ensaio para cada experimento, utilizando um cronômetro como auxílio. De modo, que possa ser visualizado os efeitos devido ao impacto das ondas no talude de montante.

4.2 Modelo físico reduzido de barragem de terra sem proteção de *rip-rap*

A primeira simulação realizada foi o modelo físico reduzido de barragem de terra sem proteção de *rip-rap*. Nesse experimento, foi gerado 30 minutos constante de ondas de 7,20 mm, objetivando de avaliar o impacto das mesmas no talude de montante, tais como erosões e possíveis escorregamentos.

Ao longo do processo de enchimento do reservatório, ou seja, o nível da água aumentando, já dava para perceber o efeito da capilaridade. E por se tratar de um modelo reduzido em pequena escala, o efeito da capilaridade é maior comparado ao que acontece em escala real. Isso também se deve ao fato do material granular que compõe a estrutura em modelo reduzido ser de areia média (segundo nomenclatura da norma ABNT NBR 6502). Portanto, favoreceu em uma visualização mais rápida dos efeitos de percolação no modelo reduzido.

A Figura 33 expõe como ocorreu o efeito da capilaridade conforme aumentava o nível de água no reservatório.

Figura 33: Efeito da capilaridade conforme aumentava nível de água.



Fonte: Autor, 2023.

Como mostra na Figura 34, pouco antes do nível de água se aproximar a 14,5 cm, valor este pré-estabelecido para o reservatório (Tabela 6), o filtro vertical e filtro horizontal mostravam-se eficientes, drenando o fluxo de água no interior do barramento.

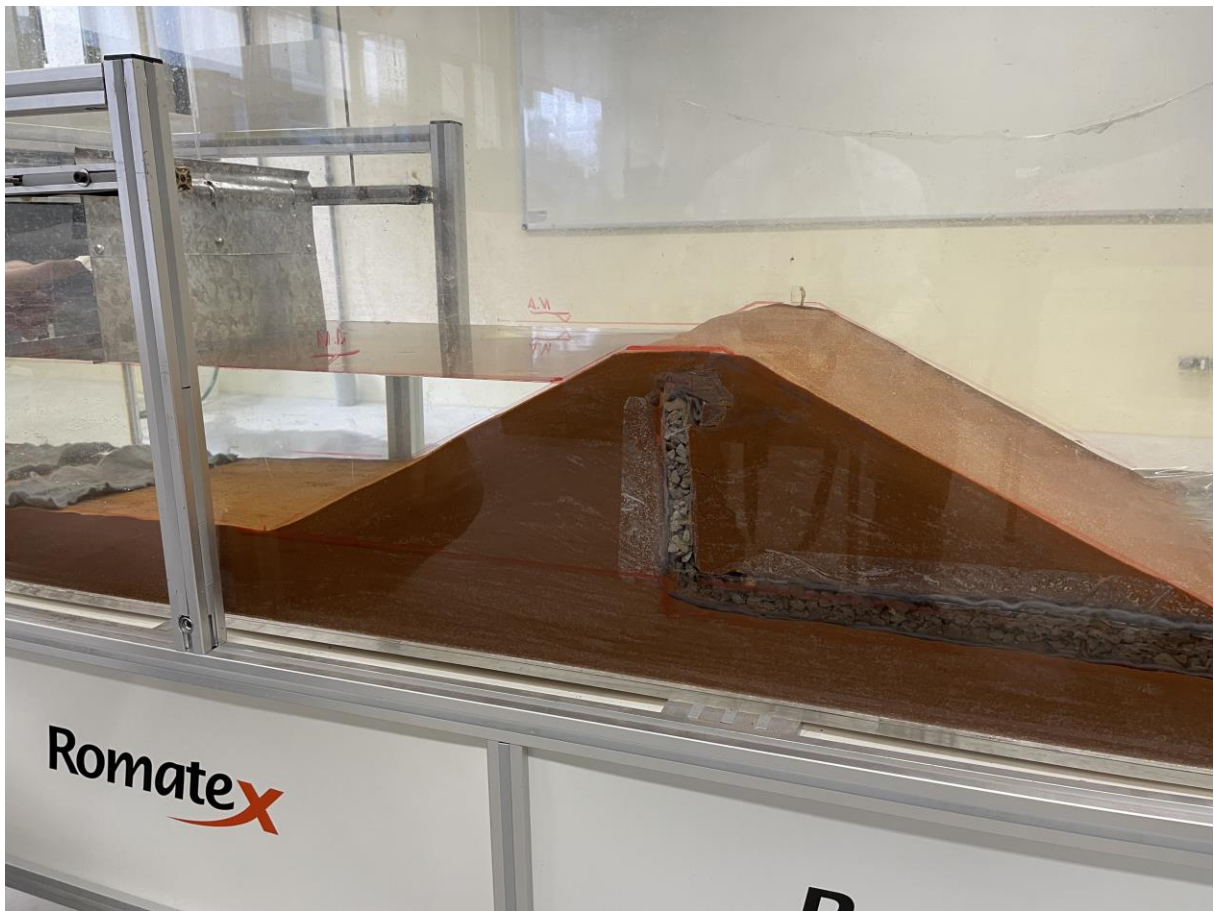
Figura 34: Filtro vertical e Filtro horizontal drenando o fluxo de água.



Fonte: Autor, 2023.

Porém, quando o nível de água atingiu a cota de 14,5 cm, o efeito de capilaridade fez com que saturasse o talude de jusante, e com isso impossibilitou a visualização da eficiência do filtro. Contudo, notou-se que no pé do talude de jusante, não ocorreu o acúmulo de água, mostrando que os filtros estavam trabalhando corretamente. Na Figura 35, é possível visualizar o talude de jusante totalmente saturado devido ao efeito de capilaridade.

Figura 35: Talude de jusante saturado devido ao efeito de capilaridade.



Fonte: Autor, 2023.

Quando o nível de água estabilizou na cota 14,5 cm, percebeu-se que começou a sair água pelo conduto de saída, onde manteve o registro aberto a todo momento. Com a água saindo do reservatório, foi regulado a entrada de água no reservatório através do registro de entrada, para que a mesma vazão que entra seja a mesma vazão que sai.

A Figura 36 mostra o tubo de saída de água, com a água do reservatório saindo com a mesma vazão de entrada.

Figura 36: Saída de água no reservatório.



Fonte: Autor, 2023.

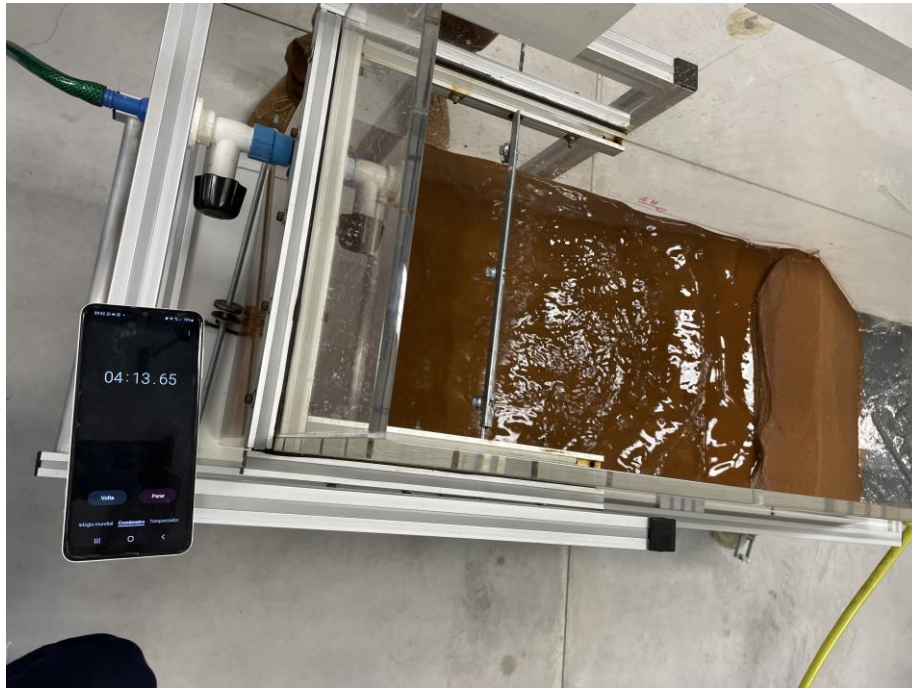
Outro fenômeno interessante que foi percebido quando o nível de água chegou na cota de 14,5 cm, foi o adensamento. O barramento adensou aproximadamente 4 mm de sua altura inicial. Percebeu-se esse fenômeno ao visualizar um rebaixamento ao nível da crista, pois o adensamento é a diminuição dos vazios do solo, devido ao acréscimo de carga da água sobre o mesmo.

Com o nível de água no reservatório em 14,5 cm e, a entrada e saída de água regulados com a mesma vazão, iniciou-se o experimento, cronometrando 30 minutos de ondas constante de 7,20 mm.

No intervalo de 0 a 10 minutos, como mostra a Figura 37 e Figura 38, já foi possível visualizar uma erosão parcial do talude de montante sem proteção de *riprap*, ocasionada pelo impacto das ondas no reservatório. Analisando de forma quantitativa, temos a porcentagem horizontal e vertical da ocorrência da erosão

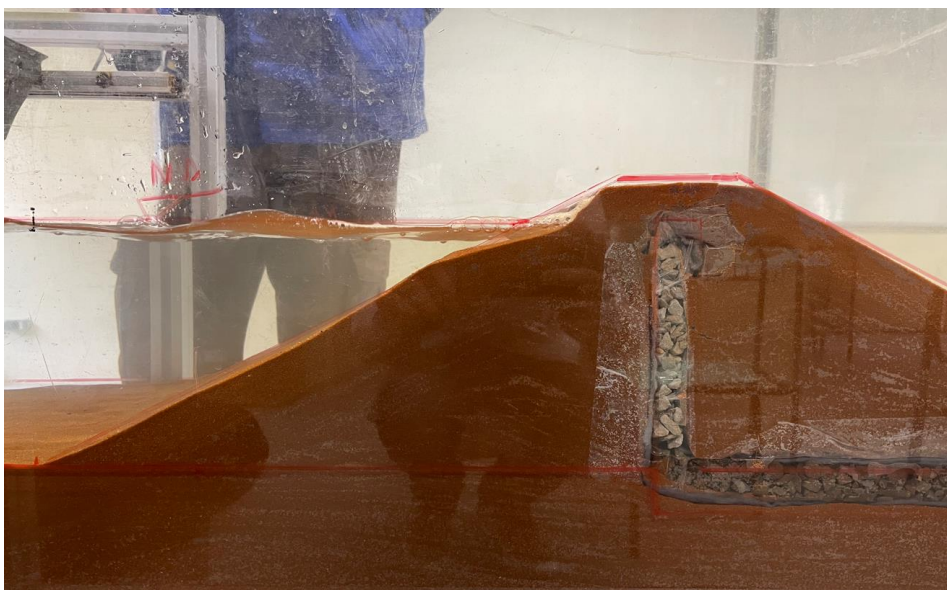
respeito às dimensões da crista do barramento, sendo, 4,6% de erosão horizontal e 3% de erosão vertical.

Figura 37: Erosão parcial do talude de montante no intervalo de 0 a 10 minutos.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 38: Erosão parcial do talude de montante.



Fonte: Autor, 2023.

No intervalo de 10 a 20 minutos, como mostra na Figura 39, o impacto das ondas geradas provocou uma erosão com formato de “rampa” no talude de montante, devido à altura da onda ocasionada pela velocidade de impacto no talude. Analisando de forma quantitativa, essa erosão foi de 53% na horizontal e 15% na vertical.

Também, é possível visualizar a remoção de solo granular do talude de montante, se distribuindo de forma uniforme no talude.

Figura 39: Erosão devido à altura da onda ocasionada pela velocidade de impacto no talude.



Fonte: Autor, 2023.

Com a continuidade do experimento, no intervalo de 20 a 30 minutos, não teve muita diferença comparado ao que ocorreu no intervalo de 10 a 20 minutos. Próximo aos 30 minutos de experimento, a erosão foi um pouco maior a partir de

onde se formou a “rampa”, sendo 64% de erosão horizontal e, 23% de erosão vertical.

Também, foi possível notar que nas laterais em relação ao centro do talude de montante, teve uma erosão devido ao repuxo da onda, como mostra na Figura 40, que seria o movimento contrário de quando ela gera a altura ocasionada pela velocidade do impacto do talude.

Figura 40: Erosão devido ao repuxo da onda.



Fonte: Autor, 2023.

No modelo reduzido de barragem sem proteção de *rip-rap*, percebeu-se que à medida que começou saturar a areia, tanto da fundação quanto do barramento, começou o processo de adensamento da areia, como uma anomalia. Pois quando estabilizou o nível de água pré-estabelecido de 14,5 cm, o barramento através da crista adensou aproximadamente 0,4 mm. No entanto não foi observado trincas ou fendas, já que tinha um sistema de filtros.

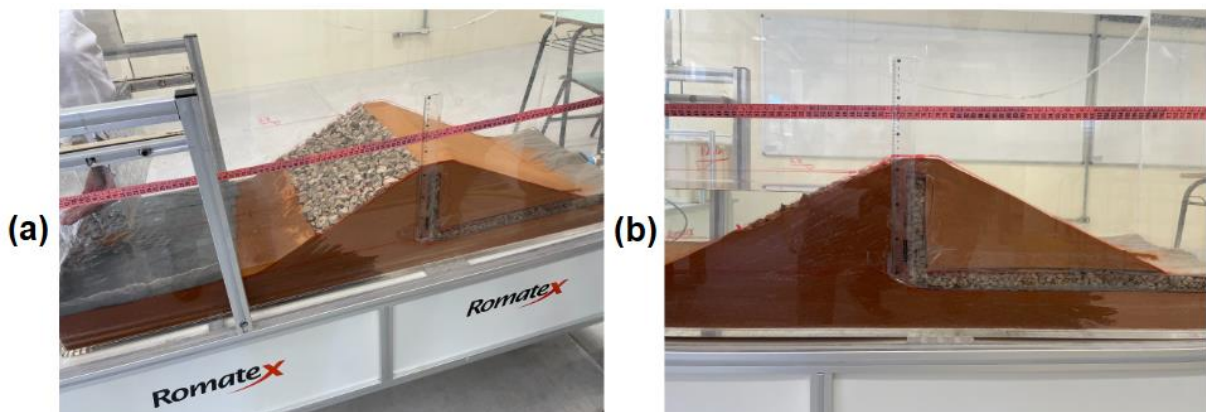
Comparando os resultados obtidos neste experimento com os resultados de Marques e Ferreira (2009), que também elaboraram um protótipo de barragem de aterro experimental em areia, as patologias que os autores encontraram não foram visualizadas no presente trabalho. Os autores tiveram problemas de erosão devida à ressurgência no paramento de jusante, e também a um surgimento de uma fenda vertical no coroamento, pelo fato de não possuir sistema de filtros.

4.3 Modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento

Para essa segunda simulação, utilizando no modelo físico reduzido de barragem de terra uma proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento, através da Tabela 1, exposta na Subseção 2.2, determina-se a espessura da camada de *rip-rap* em relação à altura máxima de ondas no reservatório. Possuindo uma altura de onda gerada de 7,20 mm no reservatório, a espessura de *rip-rap* será de 0,46 m, ou seja, 4,6 mm.

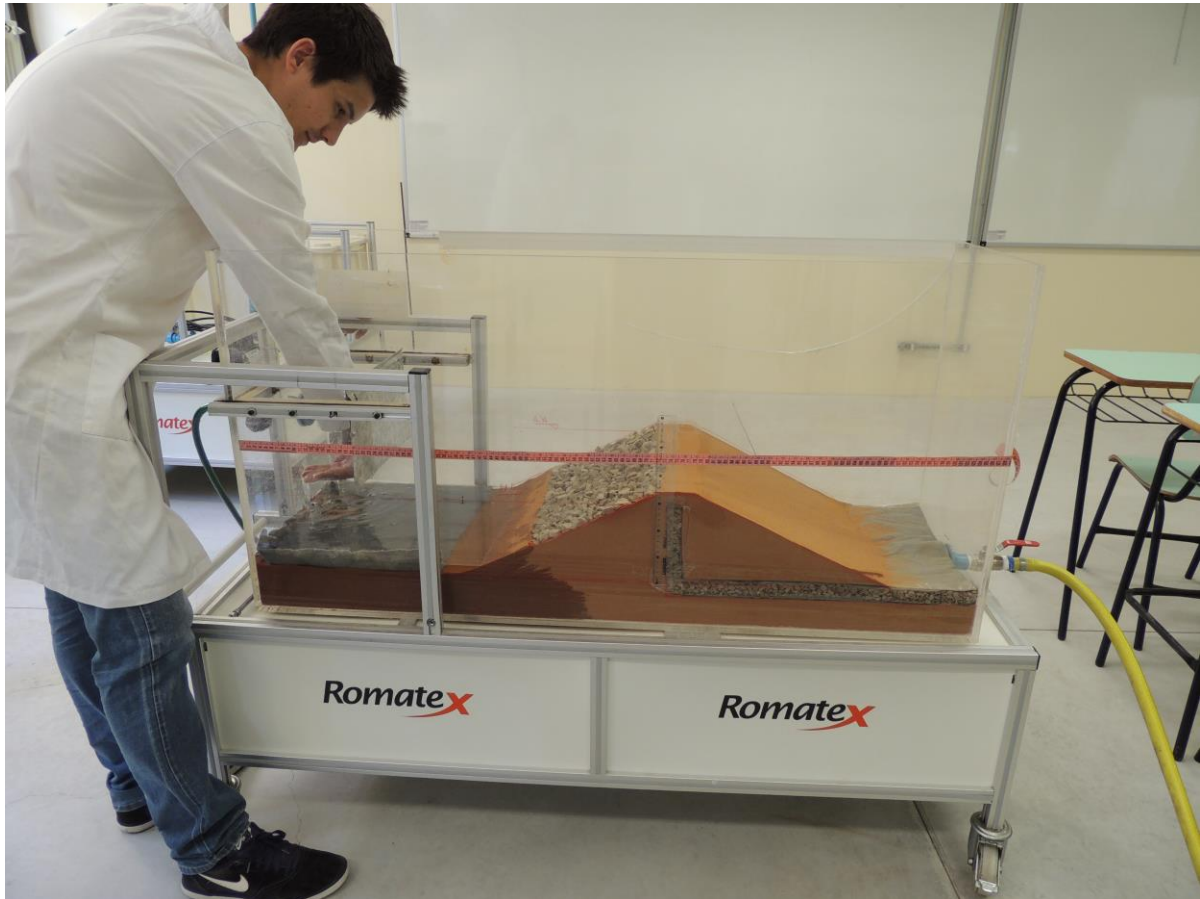
Para começar o experimento, encheu-se o reservatório (Figura 41a e Figura 41b), onde novamente visualizou-se o efeito da capilaridade (Figura 41a e Figura 42), o adensamento do barramento (Figura 41b) e, a eficiência do filtro vertical e horizontal (Figura 41b).

Figura 41: Enchimento do reservatório para o segundo experimento.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 42: Diminuindo o impacto da queda de água para enchimento do reservatório.



Fonte: Autor, 2023.

Com o nível de água estabilizado na cota 14,5 cm, iniciou as ondas de 7,20 mm com 30 minutos de simulação. No intervalo de 0 a 10 minutos foi possível visualizar uma erosão localizada onde ocorre o impacto da onda no talude de montante, de 15% horizontal e 23% vertical, respeito às dimensões da crista do barramento.

Também, ocorreu uma remoção de solo do talude de montante, ficando parcialmente exposto sobre o enrocamento. As Figuras 43 e 44, mostram os efeitos causados ao talude de montante, no intervalo de 0 a 10 minutos de onda no reservatório.

Figura 43: Erosão devido ao impacto da onda no talude de montante.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 44: Remoção do material granular do talude de montante.

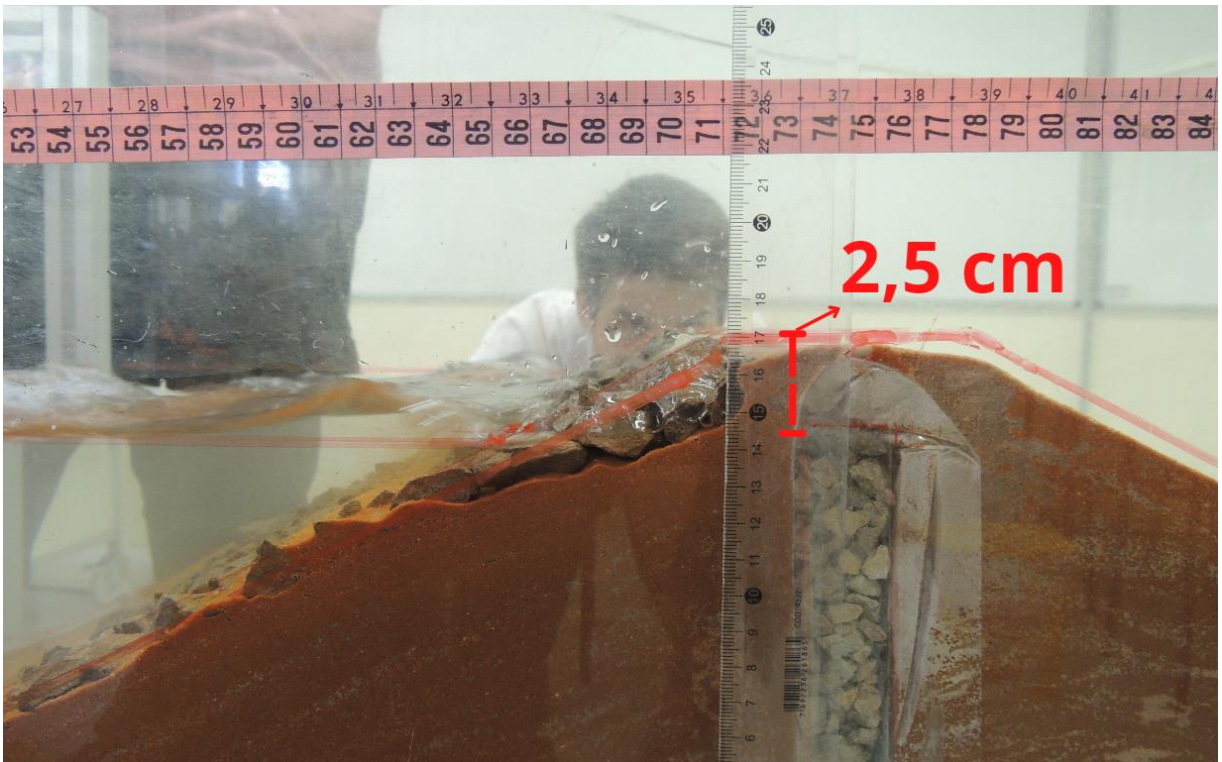


Fonte: Autor, 2023.

Analisando a erosão que ocorreu no talude de montante, ainda no intervalo de 0 a 10 minutos de experimento, notou-se que ocorreu uma forma de adensamento no vértice do talude de montante com a crista, exatamente onde ocorre o impacto da onda no talude de montante. Mas em parte, o adensamento foi gerado pelo efeito, além das ondas, foi pela baixa densidade de compactação da areia disposta e pela própria saturação do solo, aumentando o seu peso aparente, consequentemente o adensamento da fundação e do barramento. Essa erosão diminuiu a altura do barramento em aproximadamente 2,5 cm.

Na Figura 45, observa-se o acontecimento desse fenômeno.

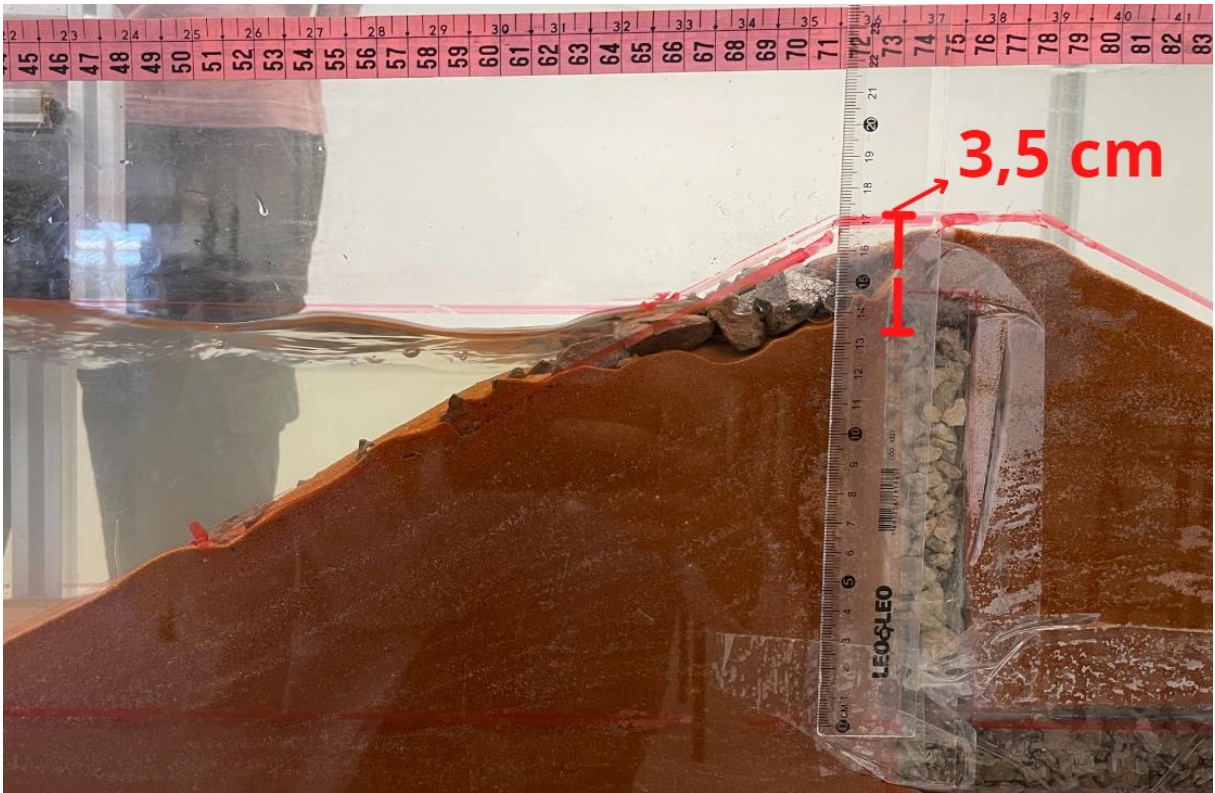
Figura 45: Erosão de 2,5 cm do talude de montante.



Fonte: Autor, 2023.

No intervalo de 10 a 20 minutos de experimento, os efeitos já visualizados no intervalo de 0 a 10 minutos tiveram um aumento, onde foi notório que a erosão no talude de montante que antes teve registro de 2,5 cm, passou a ser de 3,5 cm, como mostra na Figura 46. A erosão ocorrida nesse intervalo, foi de 23% horizontal e 38% na vertical.

Figura 46: Erosão de 3,5 cm do talude de montante.

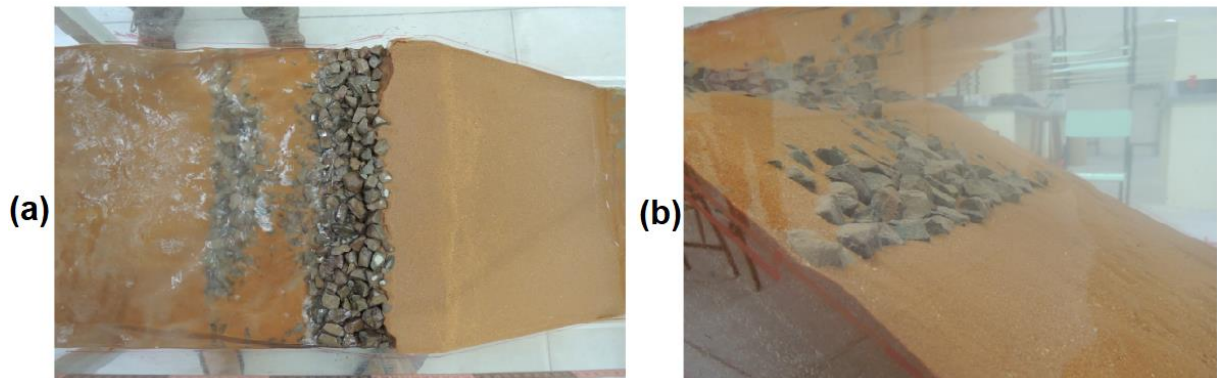


Fonte: Autor, 2023.

Também, foi possível analisar que a remoção do material granular que compõe o talude de montante foi maior (Figura 47a e Figura 47b), comparado com ao intervalo de experimento de 0 a 10 minutos. Com o impacto da onda no talude de montante, o enrocamento está adensando cada vez mais, e a degradação do barramento é visível.

Observa-se em vista superior e frontal na Figura 47, efeitos que ocorrem no talude de montante com proteção de *rip-rap* de enrocamento, sob os efeitos do impacto de ondas de 7,20 mm.

Figura 47: Visualização dos efeitos em 10 a 20 minutos de experimento.

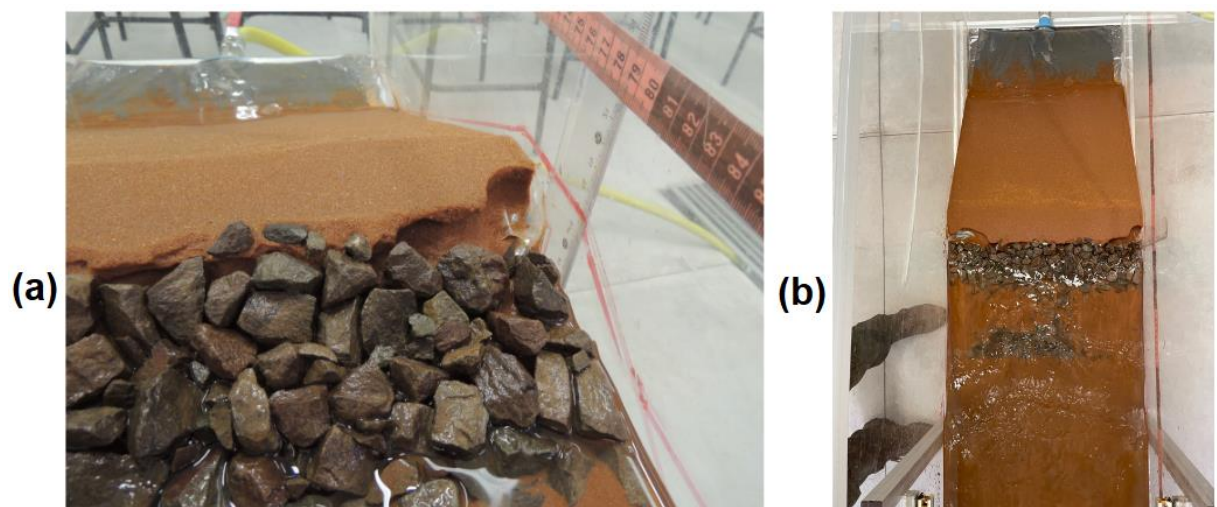


Fonte: Autor, 2023.

No intervalo de 20 a 30 minutos, o estado de degradação do barramento aumentou, a altura de impacto da onda, devido a velocidade, ocasionou uma erosão no talude de montante, ocorrendo aproximadamente até a metade da crista, adensando cada vez mais o enrocamento (Figura 48a e Figura 48b). De forma quantitativa, a erosão foi de 38% horizontal e 38% vertical.

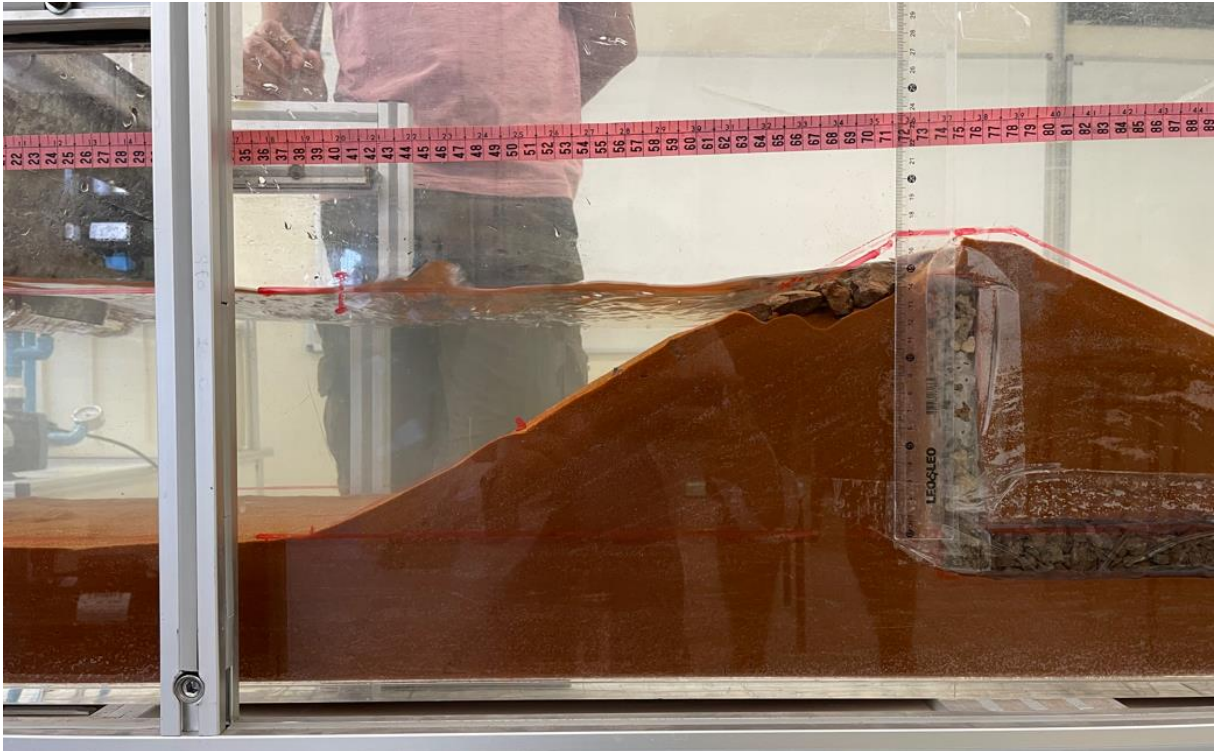
Nas Figuras 48 e 49, é possível visualizar os fenômenos ocorridos em 20 a 30 minutos de experimento.

Figura 48: Visualização dos efeitos em 20 a 30 minutos de experimento.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 49: Visualização frontal dos efeitos em 20 a 30 minutos de experimento.



Fonte: Autor, 2023.

A remoção do material granular aumentou, devido ao impacto da onda e o repuxo que elas geram, ocorrendo o fenômeno de adensamento do enrocamento e levantamento das partículas de areia que compõem o barramento, com isso, parte do *rip-rap* sob uso de enrocamento ficou soterrado no material granular, como pode-se verificar na Figura 50.

Figura 50: Aumento da remoção de material granular no talude de montante.



Fonte: Autor, 2023.

Novamente, nesse segundo experimento realizado, verificou-se o adensamento do barramento devido ao enchimento da água. No entanto constatou-se que esse adensamento foi incrementado pela atividade das ondas, que começou a suspender o solo, provocando uma intrusão da rocha. Em função disso, também se percebeu um aumento da perda de solo da crista.

Salinas (2017) em sua pesquisa, registrou uma erosão no talude de montante de uma barragem de terra, cuja a mesma possuía proteção de enrocamento. Na Figura 51 apresenta o registro realizado por Salinas (2017).

Figura 51: Erosão no talude de montante de barragem de terra.



Fonte: Salinas, 2017.

Analisando a Figura 51, é possível comparar o efeito de erosão que ocorre em uma barragem de terra em escala real, com ao efeito de erosão visto no experimento em modelo reduzido. Percebe-se que houve uma perda vertical de solo que compõem a crista, reduzindo a seção do barramento. Com isso, é visível a semelhança com os resultados obtidos no experimento em modelo reduzido.

4.4 Modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana

Nesta terceira simulação, a geomembrana utilizada é a Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com 1,5 mm de espessura.

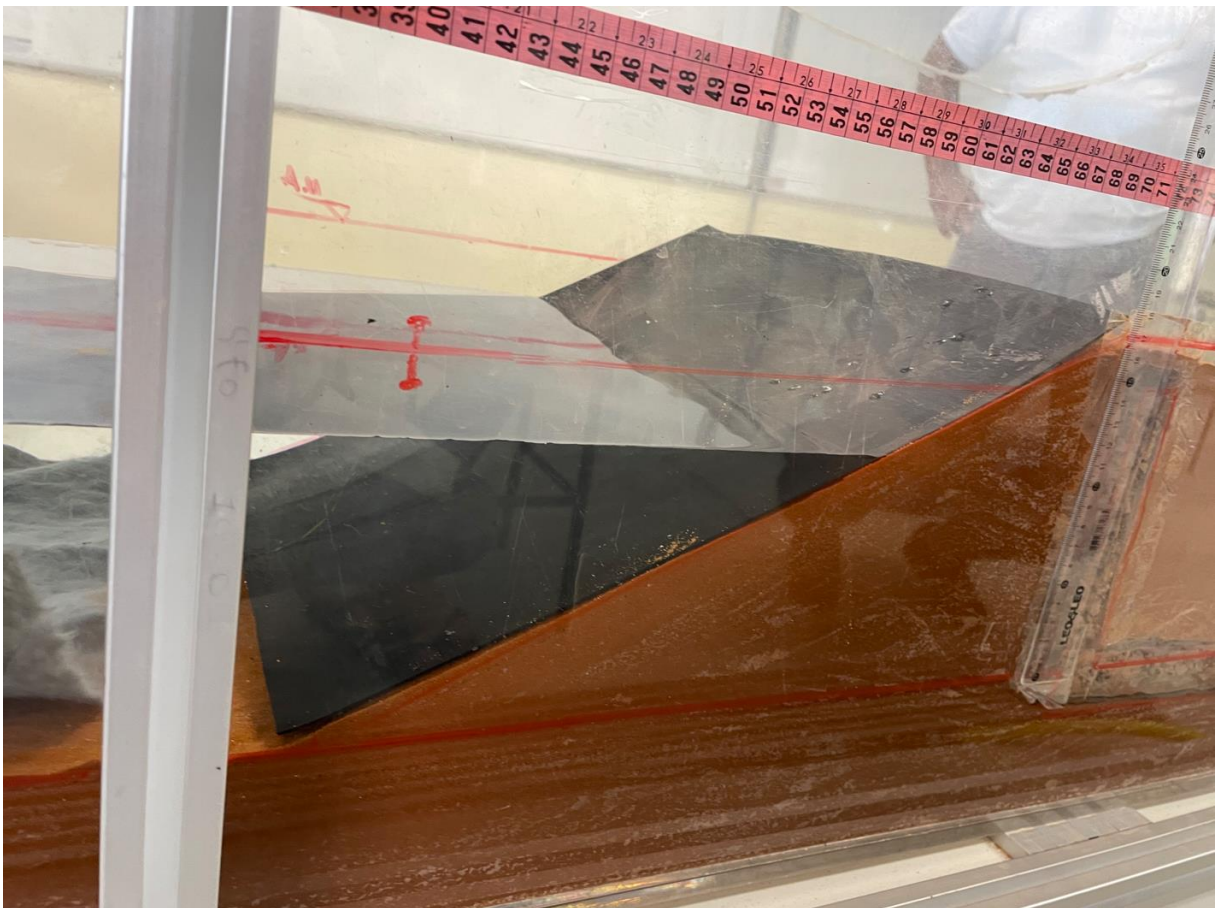
Devido ao enchimento do reservatório nas simulações anteriores, possibilitou perceber uma acomodação da fundação e do barramento, o que implicou com o adensamento da barragem. Com isso, optou-se por fazer dois ensaios com a geomembrana; sendo o primeiro ensaio com a geomembrana sem ancoragem no barramento, e o segundo ensaio com a geomembrana ancorada no barramento.

Na aplicação da geomembrana ancorada no talude de montante, foi utilizada fita adesiva transparente, com o intuito de vedar as laterais, entre o contato da geomembrana com a parede do tanque de acrílico.

Para o primeiro ensaio, que envolveu o uso da geomembrana apoiada no talude de montante sem ancoragem, iniciou-se com o enchimento do reservatório até o nível de água de 14,5 cm. Conforme o nível da água subia, foi possível notar a capilaridade e o adensamento do barramento, como já visto nas simulações anteriores.

A Figura 52 abaixo, mostra o modelo físico reduzido de barragem de terra com a geomembrana sob o talude de montante, sem ancoragem no barramento.

Figura 52: Geomembrana sob o talude de montante sem ancoragem.



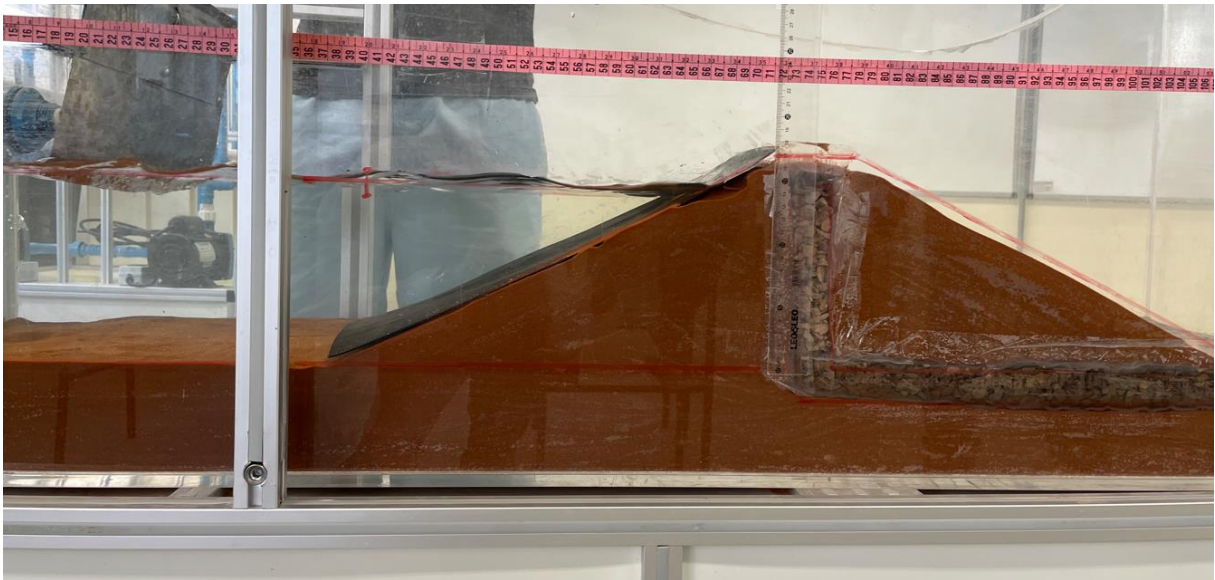
Fonte: Autor, 2023.

Com o nível de água estabilizado em 14,5 cm, começou-se o experimento, gerando ondas de 7,20 mm em 30 minutos. Porém, a geomembrana sem ancoragem, no intervalo de 0 a 10 minutos, foi possível visualizar uma erosão localizada, onde ocorre o impacto da onda no talude de montante. Essa erosão em

termos de porcentagens respeito às dimensões da crista do barramento, foi de 30% horizontal e 15% vertical.

Também, visualiza-se um adensamento do barramento em aproximadamente 5 mm, como mostra na Figura 53.

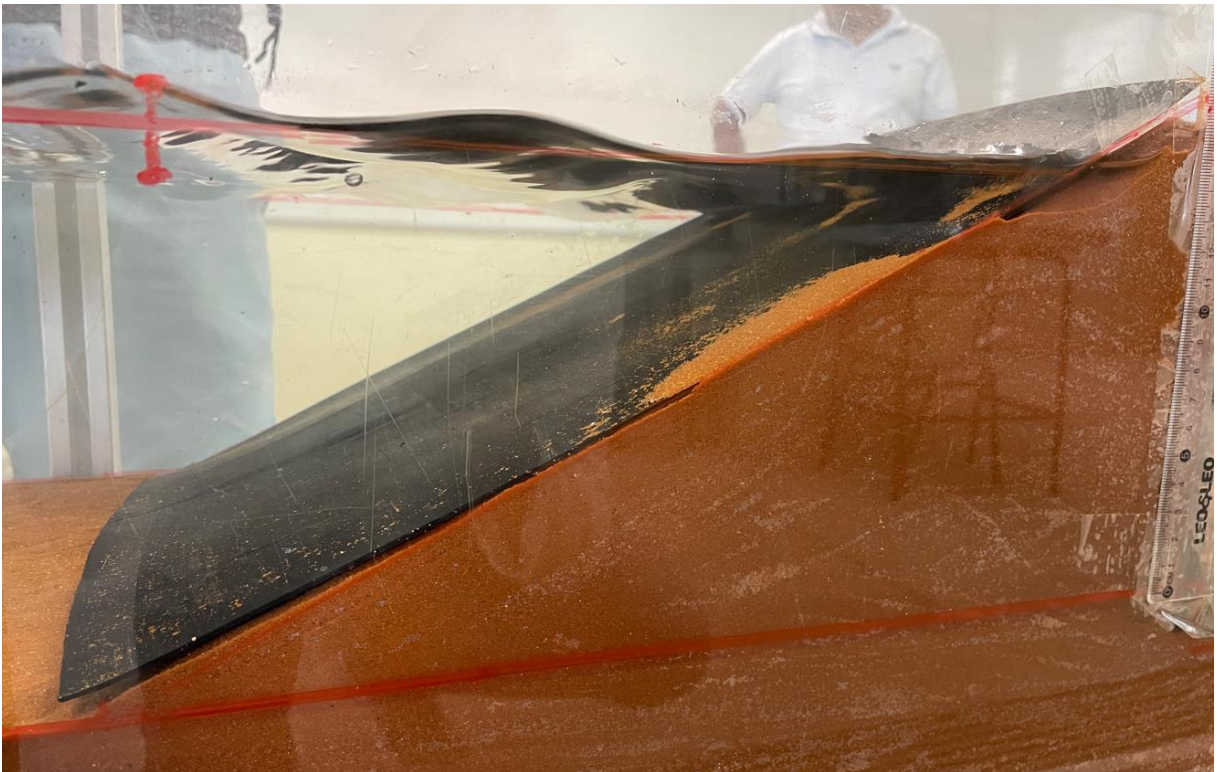
Figura 53: Intervalo de 0 a 10 minutos do primeiro ensaio com geomembrana sobre o talude de montante.



Fonte: Autor, 2023.

Conforme a onda de 7,20 mm impactava no talude de montante, o material granular era removido do barramento, sobressaindo nas laterais da geomembrana (Figura 54).

Figura 54: Sobreposição do material granular nas laterais da geomembrana.

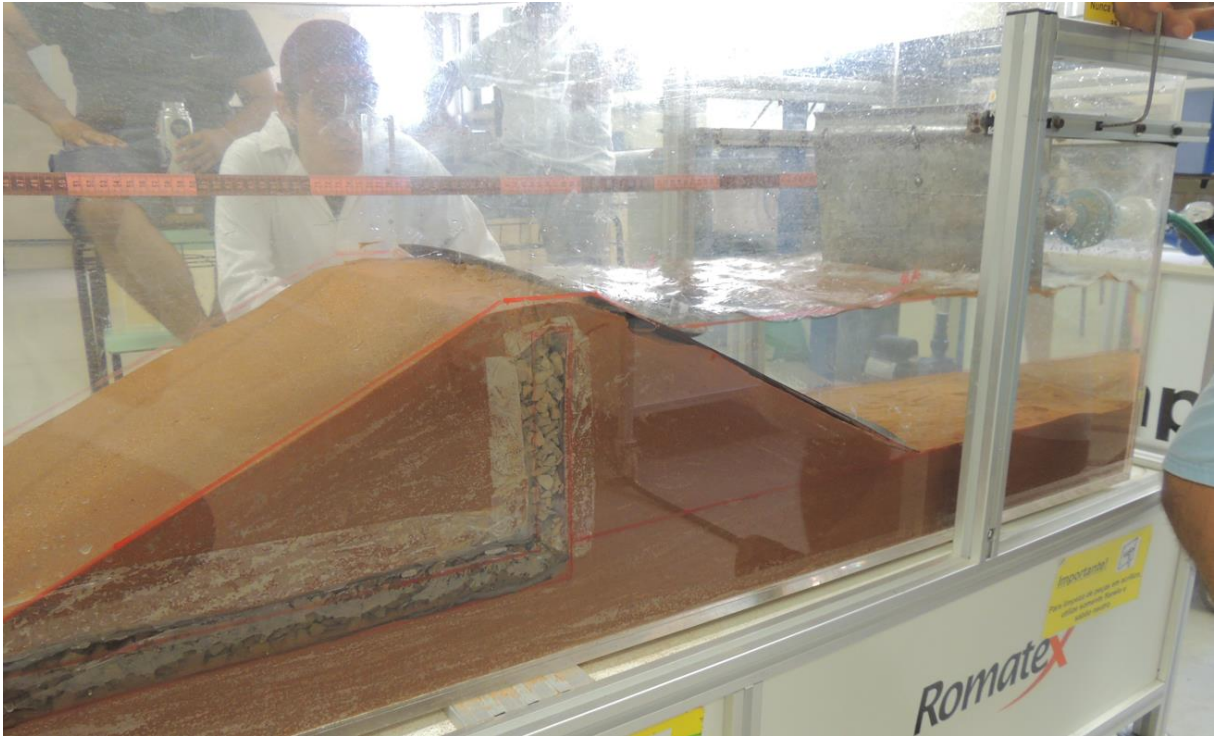


Fonte: Autor, 2023.

No intervalo de 10 a 20 minutos de experimento, a erosão teve um aumento comparada ao intervalo de 0 a 10 minutos, sendo de 46% em relação a largura da crista e 38% a altura da barragem. Contudo, é notório que a erosão ocorreu nas laterais, mostrando que a geomembrana aparentemente está demonstrando eficiência quanto a parte frontal do talude de montante. Essa erosão lateral ocorreu justamente devido à manta estar apenas sobreposta ao talude de montante, sem as vedações laterais, que fazem o papel de ancoragem da geomembrana, cuja ancoragem acontece em escala real.

A Figura 55, apresenta outro ângulo dos efeitos ocasionados pelo impacto da onda de 7,20 mm, no talude de montante com proteção sob uso de geomembrana sem ancoragem.

Figura 55: Erosão no talude de montante com proteção sob uso de geomembrana sem ancoragem.



Fonte: Autor, 2023.

No intervalo de 20 a 30 minutos de experimento, a erosão que ocorre nas laterais do modelo reduzido de barragem de terra apresentou um aumento, como mostra na Figura 56. De forma quantitativa, a erosão nesse intervalo foi de 53% horizontal e 38% vertical.

Figura 56: Aumento da erosão lateral em intervalo de 20 a 30 minutos.



Fonte: Autor, 2023.

É interessante observar, que ao longo de todo o experimento, o filtro vertical e o horizontal apresentaram ótimo desempenho, mesmo não permitindo a visualização da rede de fluxo devido ao efeito da capilaridade. A Figura 57 mostra o nível da água mantendo-se sempre ao nível da fundação da jusante, que no caso, é o mesmo nível de saída de água. Isso prova a eficiência de drenagem que os filtros em uma barragem de terra proporcionam.

Figura 57: Eficiência do filtro vertical e horizontal em uma barragem de terra.



Fonte: Autor, 2023.

Para recomposição da seção, montando o modelo reduzido de barragem de terra novamente em suas dimensões iniciais, foi retirada a geomembrana sobre o talude de montante, como mostra na Figura 58 abaixo. Em que, foi possível analisar como a geomembrana sem ancoragem se comportou aos 30 minutos de experimento, realizado no ensaio sem a ancoragem no barramento.

Figura 58: Remoção da geomembrana sobre o talude de montante.

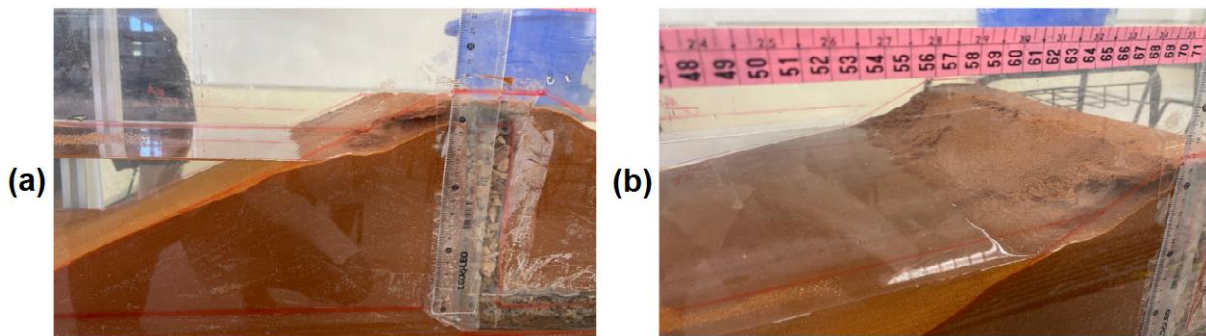


Fonte: Autor, 2023.

Ao analisar o talude de montante sem a geomembrana, percebeu-se que a erosão ocorreu somente nas laterais que não estavam vedadas (Figura 59a e Figura 59b), enquanto que no centro do talude de montante, levando em consideração ao nível onde ocorria o impacto das ondas no reservatório, estava sem indício de erosão ou remoção de solo granular.

É apresentado abaixo a Figura 59, na qual pode-se analisar o talude de montante sem a geomembrana, após 30 minutos de experimento.

Figura 59: Análise da remoção da geomembrana sobre o talude de montante.



Fonte: Autor, 2023.

Em primeiro momento foi executado o ensaio com uso de geomembrana sem ancoragem. Na aplicação da geomembrana sem ancoragem, um dos fatores que prejudicou o ensaio foi o processo de adensamento que ocorreu devido à saturação do solo, o que implicou para o segundo ensaio, a recomposição da seção da barragem antes de aplicar e ancorar a geomembrana.

Após ter realizado a reposição de solo saturado no barramento, no intuito de recompor a seção, foi colocado novamente a geomembrana sobre o talude de montante, vedando as laterais com fita adesiva transparente. As Figuras 60 e 61 expõem a montagem do modelo físico reduzido de barragem de terra com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana, com a estrutura do barramento reconstruída com acréscimo de areia saturada.

Figura 60: Estrutura do barramento reconstruída com acréscimo de areia saturada.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 61: Geomembrana com vedação nas laterais utilizando fita adesiva transparente.



Fonte: Autor, 2023.

No segundo momento, estabilizado o nível da água, foi cronometrado 30 minutos de ondas no reservatório, possuindo uma altura de 7,20 mm.

No intervalo de 0 a 10 minutos de ondas geradas no reservatório, não houve nenhuma alteração na estrutura do barramento sob utilização de geomembrana ancorada, como mostra na Figura 62.

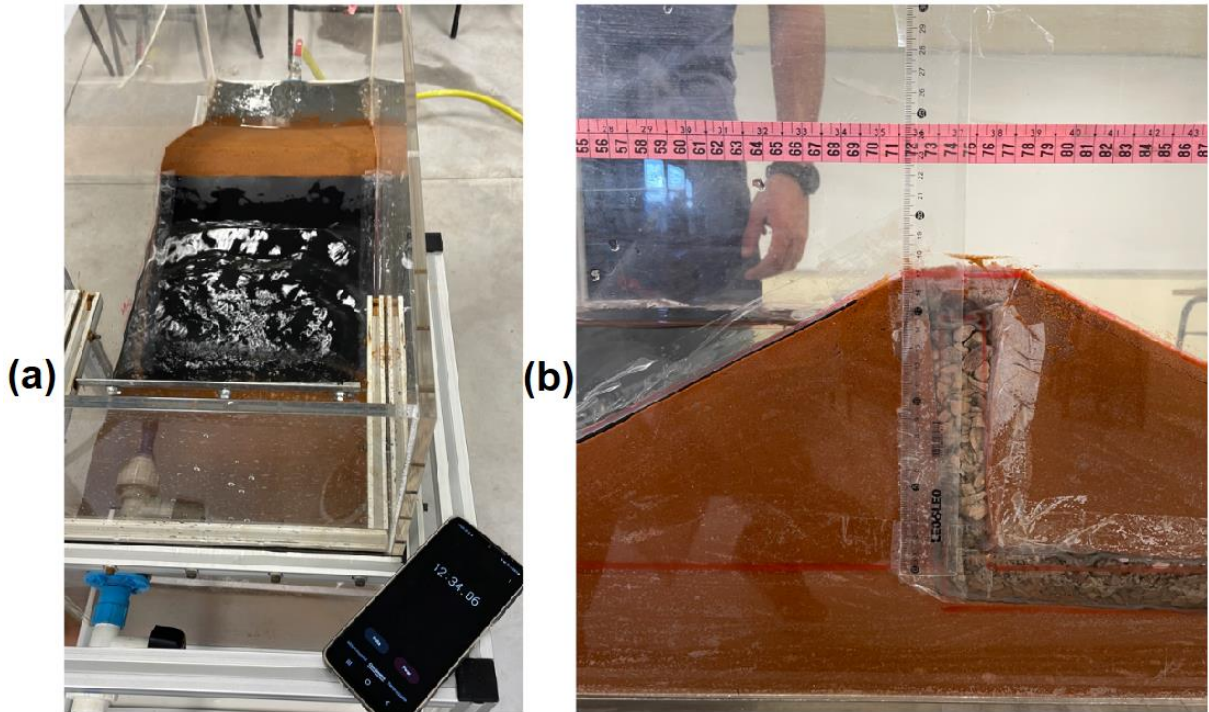
Figura 62: Intervalo de 0 a 10 minutos de ondas sem alteração na estrutura do barramento sob utilização de geomembrana ancorada.



Fonte: Autor, 2023.

No intervalo de 10 a 20 minutos de ondas geradas no reservatório (Figura 63a e Figura 63b), também não houve absolutamente nenhum indício de erosão ou qualquer outro fenômeno decorrente ao impacto da onda no talude de montante.

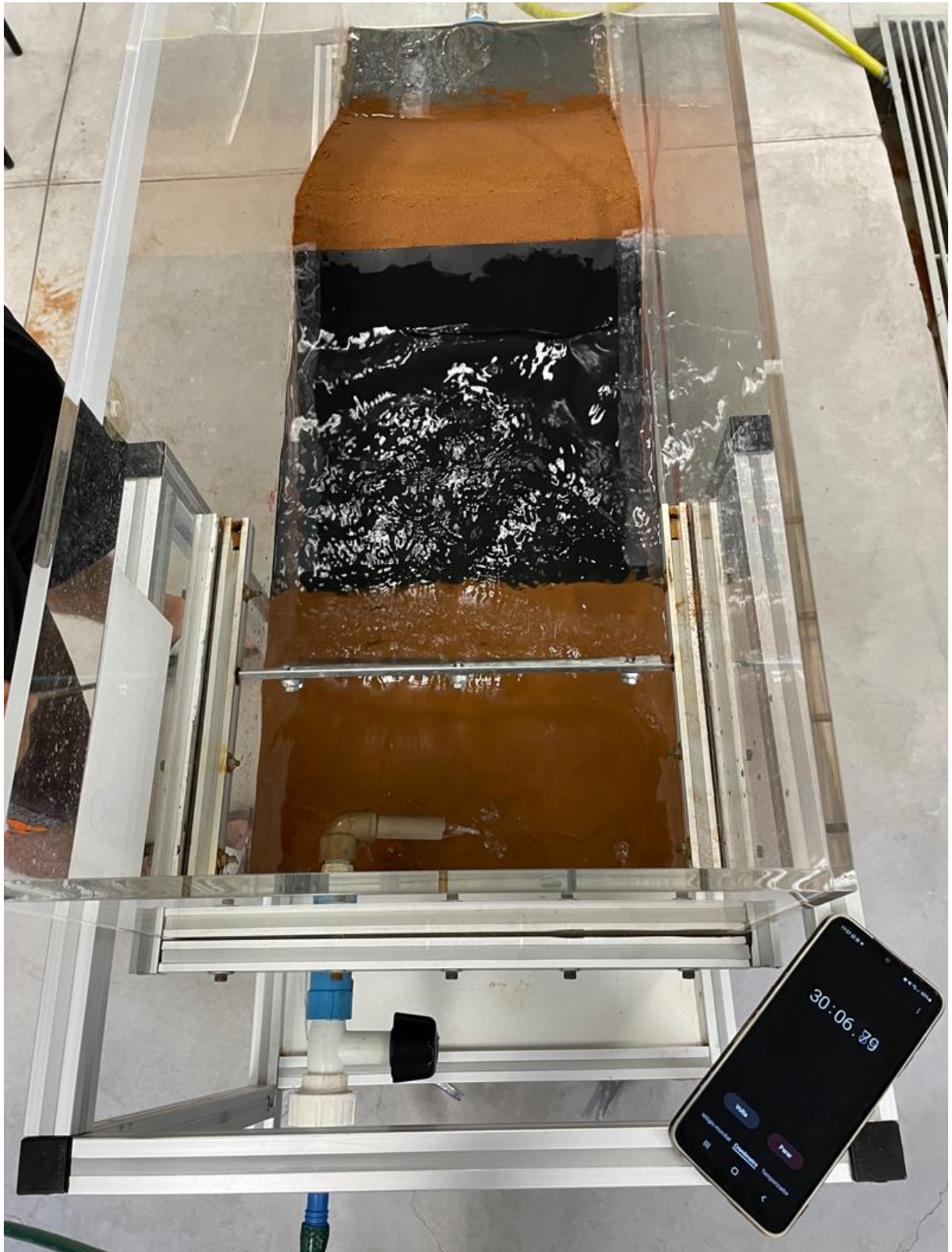
Figura 63: Intervalo de 10 a 20 minutos de ondas sem alteração na estrutura do barramento sob utilização de geomembrana ancorada.



Fonte: Autor, 2023.

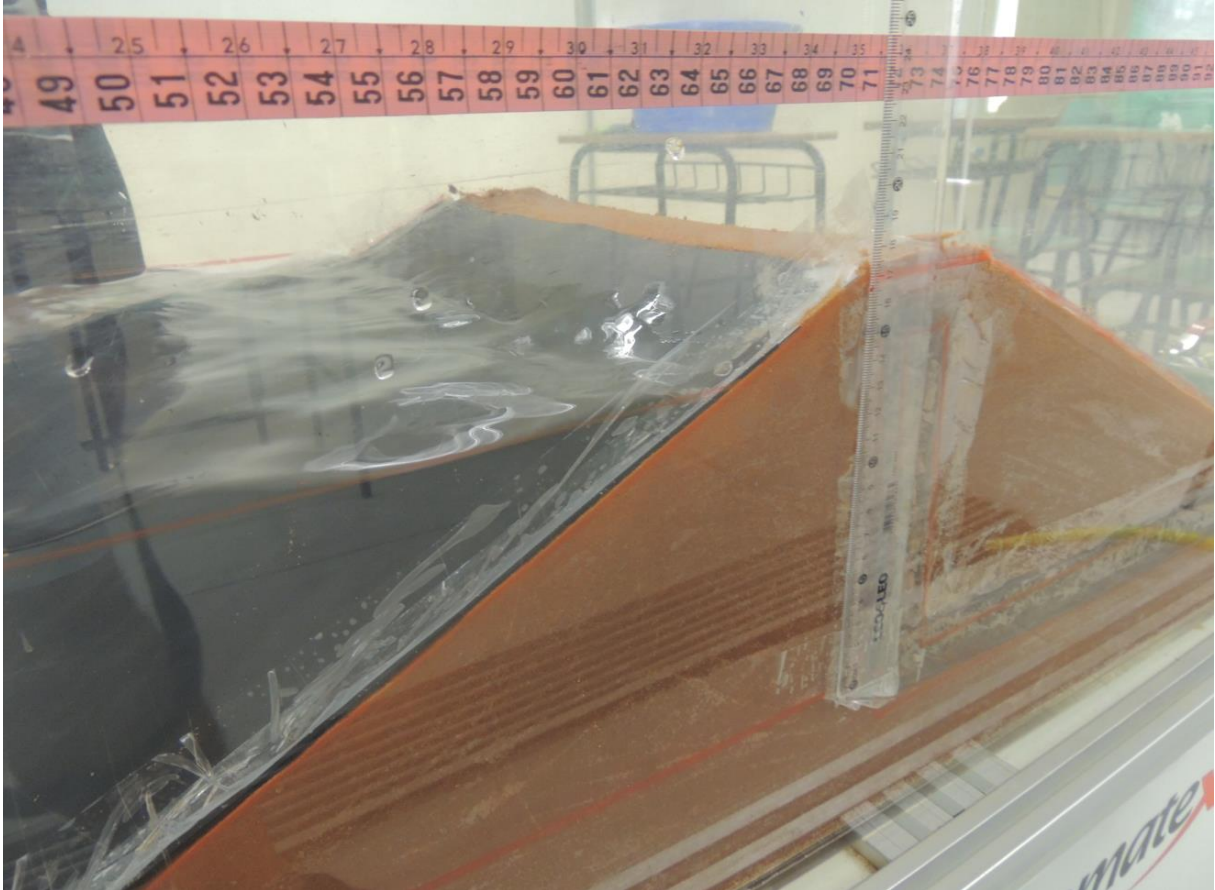
Por fim, no intervalo de 20 a 30 minutos de ondas geradas no reservatório, também não houve alteração na estrutura do modelo reduzido de barragem de terra, como mostra na Figura 64 e 65.

Figura 64: Intervalo de 20 a 30 minutos de ondas sem alteração na estrutura do barramento sob utilização de geomembrana ancorada.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 65: Sem indício de algum fenômeno decorrente ao impacto da onda no talude de montante.



Fonte: Autor, 2023.

Pierozan (2014) em seu trabalho de dissertação, relatou que as simulações realizadas por ele mostraram a ocorrência de elevados gradientes hidráulicos na região de ancoragem da geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), no talude de montante. Com os resultados obtidos, o autor relata que o bom funcionamento da geomembrana como tapete impermeabilizante sobre o talude de montante está condicionado à ligação entre o tapete impermeabilizante e a vedação do aterro da barragem. Desse modo, Pierozan (2014) recomenda utilizar um sistema de ancoragem no talude de montante da barragem de terra.

Tendo em vista, o trabalho realizado pelo autor, pode-se ressaltar a importância de ancoragem da geomembrana em barragem de terra, que no caso do experimento em modelo físico reduzido de barragem de terra, com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana, a ancoragem foi feita de modo a

representar a vedação entre a geomembrana e o tanque de acrílico, exercendo dessa forma, uma mesma função: que é garantir a ligação entre a geomembrana e a barragem, e conseqüentemente, garantir a vedação da barragem de terra.

4.5 Análise comparativa

Com base nos resultados encontrados nas três situações de simulações experimentais, no modelo físico reduzido de barragem de terra, é possível realizar uma análise comparativa.

A Tabela 8 expõe os resultados encontrados em função das simulações experimentais, envolvendo o processo do enchimento do reservatório e, os intervalos de tempo da ação das ondas no talude de montante do barramento. Dessa forma são apresentados os resultados registrados tais como, adensamento e capilaridade do solo, proporção horizontal e vertical (em termos de porcentagem) da ocorrência de erosão respeito às dimensões da crista do barramento, e remoção do solo granular do talude de montante do barramento.

Tabela 8: Resultados encontrados nas três simulações experimentais.

Ensaio	Enchimento	Intervalo de tempo de 0 a 10 minutos	Intervalo de tempo de 10 a 20 minutos	Intervalo de tempo de 20 a 30 minutos
Sem proteção de rip-rap	Adensamento e capilaridade	Erosão: 0,046/0,03	Erosão: 0,53/0,15 e remoção do solo	Erosão: 0,64/0,23
Rip-rap sob uso de enrocamento	Adensamento e capilaridade	Erosão: 0,15/0,23 e remoção do solo	Erosão: 0,23/0,38; remoção do solo e adensamento	Erosão: 0,38/0,38 remoção do solo
Proteção do talude de montante sob uso de geomembrana sem ancoragem	Adensamento e capilaridade	Erosão: 0,30/0,15 remoção do solo	Erosão: 0,46/0,38	Erosão: 0,53/0,38
Proteção do talude de montante sob uso de geomembrana com ancoragem	Adensamento e capilaridade	Sem anomalia	Sem anomalia	Sem anomalia

Fonte: Autor, 2023.

Conforme apresentado na Tabela 8, no processo de enchimento do reservatório, percebeu-se para os quatro ensaios realizados, a ocorrência do adensamento do barramento, assim também, o desenvolvimento da capilaridade. Para a realização do quarto ensaio, que envolveu o uso da geomembrana ancorada, ressalta-se novamente, o aproveitamento da mesma montagem do modelo reduzido que compreendeu a simulação com geomembrana não ancorada.

Para o intervalo de 0 a 10 minutos de ondas e comparando os resultados obtidos nos quatro ensaios realizados, percebe-se que a simulação no modelo físico reduzido de barragem com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana sem ancoragem, apresentou maiores problemas de erosão à crista do barramento. Já o quarto ensaio realizado, com a geomembrana ancorada no talude de montante, não apresentou nenhuma anomalia (erosão e remoção da areia), demonstrando assim ser favorável à proteção no talude de montante contra os impactos de ondas.

Com o transcorrer do tempo, no intervalo de 10 a 20 minutos de ondas, a simulação sem proteção de *rip-rap* foi a mais crítica em efeito de erosão, superando em proporção à registrada nos ensaios que envolveram o uso da geomembrana sem ancoragem e, ao do *rip-rap* com enrocamento. Porém, a simulação com enrocamento apresentou um aumento na remoção do solo do topo do talude e, conseqüentemente, o adensamento da crista. Ainda nesse intervalo de tempo, verificou-se que o quarto ensaio (uso de geomembrana com ancoragem) novamente não apresentou nenhuma anomalia.

No intervalo final acumulado de 20 a 30 minutos de ocorrência das ondas, a simulação sem proteção de *rip-rap* mostrou maiores proporções de erosão se comparado aos demais ensaios. E também, pode-se destacar que ao longo do processo do desenvolvimento das ondas, o ensaio da proteção do talude de montante sob uso de geomembrana com ancoragem não apresentou nenhuma anomalia.

Nas três simulações realizadas (barramento sem proteção de *rip-rap*, com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento e, proteção do talude de montante com geomembrana), verificou-se que o processo de erosão se mostrou mais significativo na primeira simulação, tanto no primeiro intervalo, quanto no segundo e terceiro, como mostra na Tabela 8. A variação da proporção de erosão em 30 minutos de ensaio, foi de 64% em relação a largura da crista e 23% a altura da barragem.

Quanto a remoção do solo granular, pode-se dizer que ocorreu nas simulações: sem proteção de *rip-rap*, com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento e, proteção do talude de montante com geomembrana sem ancoragem.

Em termos comparativos (Tabela 8), a partir dos ensaios sob uso de geomembrana, destaca-se a importância da ancoragem e selagem, impedindo

dessa forma a infiltração da água no solo, pois uma falha nesse processo pode levar a ocorrência de anomalias, comprometendo à segurança do barramento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este presente trabalho, possibilitou estudar em modelo físico reduzido, o efeito do impacto das ondas dos reservatórios, em barramentos nas condições: modelo físico reduzido de barragem sem proteção de *rip-rap*, modelo físico reduzido de barragem com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento e, modelo físico reduzido de barragem com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana. Porém, algumas limitações foram encontradas a partir do solo utilizado (areia média), tais como: efeito de capilaridade e, devido a baixa densidade do barramento a ocorrência de adensamento.

Com base nas pesquisas bibliográficas e compilação de informações realizadas no trabalho, pode-se dizer que para o município de Alegrete, situado no estado do Rio Grande do Sul, a velocidade máxima básica do vento é de 162 km/h, podendo gerar uma onda de até 0,72 metros.

Na simulação em modelo físico reduzido de barragem sem proteção de *rip-rap*, pode-se concluir que devido ao impacto das ondas, houve maiores proporções de erosões se comparada com as demais simulações (modelo físico reduzido de barragem com proteção de *rip-rap* sob uso de enrocamento e modelo físico reduzido de barragem com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana).

O estudo em modelo físico reduzido, mostrou que a simulação de ondas no reservatório, aplicado para o barramento com proteção do talude de montante sob uso de geomembrana ancorada, não gerou patologias vinculadas a erosão e remoção de solos do talude de montante.

Finalmente, a partir dos resultados obtidos deste trabalho, conclui-se a possibilidade do uso de geomembranas como proteção de taludes de montante em barramentos de pequeno porte.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1988. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5616/abnt-nbr6123-forcas-devidas-ao-vento-em-edificacoes>. Acessado em fev. de 2023.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502. Solos e rochas - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/7933/abnt-nbr6502-solos-e-rochas-terminologia>. Acessado em fev. de 2023.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318-1. Geossintéticos, Parte 1: Termos e definições.** Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/12239/abnt-nbriso10318-1-geossinteticos-parte-1-terminologia>. Acessado em jun. de 2022.

ALMEIDA, Larissa A. **Análise da Barragem Eixo 03 (PROPERTINS) do Rio Manuel Alves, no município de Dinaópolis – TO, de acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas, 2019.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Curso de Segurança de Barragens.** Módulo 1 - Unidade 9. 2013. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/2179>. Acessado em mai. de 2022.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Resolução nº 742, de 17 de outubro de 2011.** Disponível em: <https://observatorio-eco.jusbrasil.com.br/noticias/2906827/seguranca-de-barragens-em-rios-e-regulamentada>. Acessado em jun. de 2022.

ARAÚJO, Isis M. **Análise da Aplicação de Materiais Geossintéticos em Fundações de Barragens de Terra.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Centro Universitário Christus. Curso de Engenharia Civil. Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unichristus.edu.br/jspui/handle/123456789/1139>. Acessado em jul. de 2022.

ARAUJO, Michelle C. N. de. **Estudo de Equivalência entre Drenos Franceses e Tapetes Drenantes em Barragens de Terra.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

BARBOSA, Camila C. **A utilização de materiais geossintéticos em barragens de terra e enrocamento.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba – Centro de Tecnologia. João Pessoa, 2016.

BIDIM. Disponível em: <https://bidimwavingeossinteticos.com/sistemas-de-subdrenagem/>. Acessado em jul. de 2022.

BIRCK, Mateus. **Barragens de terra homogênea: uma análise crítica entre os projetos empírico e científico.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil. Porto Alegre, 2016.

BUREAU OF RECLAMATION. **Avaliação de pequenas barragens.** 2002. Disponível em: https://www.academia.edu/38905777/MANUAL_DE_IRRIGA%C3%87%C3%83O_BRAS%C3%8DIA_DF_2002_BUREAU_OF_RECLAMATION_BRASIL. Acessado em jun. de 2022.

CAMPAGNOLO, Luciéle B. **Aplicação de Solo Eólico para Construção de Tijolos Maciços.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/6876>. Acessado em jun. de 2022.

CARVALHO, David de. **Barragens: Uma introdução para graduandos.** Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola (material didático). Campinas, 2011. Disponível em: <https://fdocumentos.tips/document/apostila-barragens-feagr-2011.html?page=1>. Acessado em ago. de 2022.

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. **Apresentação das barragens.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://cbdb.org.br/apresentacao-das-barragens>. Acessado em jun. de 2022.

COLMANETTI, Janaína P. **Estudos sobre a Aplicação de Geomembranas na Impermeabilização da Face de Montante de Barragens de Enrocamento.** 2006. Tese de Doutorado de Geotecnia. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2006.

CONSEMA. **Resolução nº 323/2016 do Conselho Estadual do Meio Ambiente.** Dispõe sobre os procedimentos de Licenciamento Ambiental dos empreendimentos de irrigação. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Publicado no DOE do dia 19/07/2017. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201902/19140815-resolucao-consema-323-2016-licenciamento-de-irrigacao.pdf>. Acessado em jul. de 2022.

CORDEIRO, Guilherme E. M. **Estudo de Fluxo em Barragens de Terra.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil (Graduação) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

COSTA, Walter D. **Geologia de Barragens.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/471518716/Geologia-de-Barragens-Walter-Duarte-Costa-1-1-pdf> . Acessado em jul. de 2022.

FERREIRA, César R. **Desenvolvimento de um Equipamento Laboratorial para o Estudo de Problemas de Percolação em Modelo Reduzido.** 2008. Relatório (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Portugal. Porto,

2008. Disponível em <https://repositorioaberto.up.pt/handle/10216/57659?locale=pt>. Acessado em jul. de 2022.

GAIOTO, N. 2003. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento**. 126 p. São Carlos: EESC-USP.

GOMES, Matheus de O.; TEIXEIRA, Rafael L. **Análise e Desenvolvimento de Projeto Construtivo de uma Pequena Barragem de Terra no Córrego da Cava – Morrinhos / GO, com Foco na Segurança**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG. Departamento de Áreas Acadêmicas. Curso Bacharelado em Engenharia Civil. Aparecida de Goiânia, 2017. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/126/3/tcc_Matheus%20Gomes_Rafael%20Teixeira.pdf. Acessado em jul. de 2022.

GÓMEZ, Carolina R. **Análise de Danos em Geomembranas por Meio de Ensaios de Laboratório em Diferentes Escalas**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/18272>. Acessado em jul. de 2022.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Banco de Dados Meteorológicos**. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acessado em jun. de 2022.

MARQUES, José C.; FERREIRA, César R. **A Percolação de Água em Solos: Estudos em Modelo Reduzido**. 4.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente [2009], FEUP, ISBN 978-989-95557-3-0. Disponível em: [22_JCoutoMarques_APercolacao](https://www.up.pt/jornadas/2009/22_JCoutoMarques_APercolacao) (up.pt). Acessado em jul. de 2022.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. Disponível em: https://www.academia.edu/36131468/Obras_de_Terra_Curso_b%C3%A1sico_de_Geotecnia_Fai%C3%A7al_Massad. Acessado em jul. de 2022.

MELO, Ladislau R. **Monitoração de Modelos Físicos Reduzidos para Investigação do Comportamento de Estruturas em Escala Real**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. São Paulo, 2011. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-31102011-120001/publico/Dissertacao_Ladislao_Roger_T_Melo.pdf. Acessado em mai. de 2022.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Secretaria de Infra - Estrutura Hídrica. Departamento de Projetos e Obras Hídricas. Brasil. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília, 2002. Disponível em: <http://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-41368/manual-de-seguranca-e-inspecao-de-barragens>. Acessado em mai. de 2022.

MIKOS, Ana P. **Uso de Geomembranas em Barragens de Terra – Estudo de Percolação em Modelo Reduzido e Numérico**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Curitiba, 2014. Disponível em: https://1221c904-4d38-44e5-8949-5acba1f23328.filesusr.com/ugd/116223_eb399ce4750c4da795927246ca5d0d6a.pdf. Acessado em ago. de 2022.

MONTEIRO, Carlo R. **Construção de Modelos Físicos de Barragens de Terra para Aula Prática**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Engenharia Agrícola. Recife, 2019. Disponível em: https://repository.ufrpe.br/bitstream/123456789/1177/1/tcc_eso_carloranny%c3%aarl_opesmonteiro.pdf. Acessado em mai. de 2022.

NETTO, Arthur S. **Análise de estabilidade de uma barragem de terra: abordagens determinística e probabilística**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11738/1/GP_COECI_2019_2_03.pdf. Acessado em jul. de 2022.

NÓBREGA, Ercylene M. **Diagnóstico Patológico da Barragem Farinha no Município de Patos – PB**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário de João Pessoa – UNIPÊ. João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://bdtcc.unipe.edu.br/wpcontent/uploads/2019/01/BARRAGEM-FARINHA-FINALIZA%C3%87%C3%83O-TCC-1.pdf>. Acessado em mai. de 2022.

OLIVEIRA, Andressa I. **Análise técnica do projeto da Barragem Conceição no município de Mamanguape – PB**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário de João Pessoa – UNIPÊ. Disponível em: <https://bdtcc.unipe.edu.br/wp-content/uploads/2019/01/MONOGRAFIA-BARRAGENS-ANDRESSA-OLIVEIRA.pdf>. Acessado em jul. de 2022.

PIEROZAN, Rodrigo C. **Aplicação de geomembranas em tapetes impermeáveis a montante de barragens de terra**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/36088/R%20-%20D%20-%20RODRIGO%20CESAR%20PIEROZAN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em jun. de 2022.

PIEROZAN, Rodrigo C. *et al.* **Aplicação de Geomembranas em Tapetes Impermeáveis a Montante de Barragens de Terra – Estudo Experimental e Numérico**. Conferência Geossintéticos. Brasília, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307557621_Aplicacao_de_Geomembranas_em_Tapetes_Impermeaveis_a_Montante_de_Barragens_de_Terra_-_Estudo_Experimental_e_Numerico. Acessado em jul. de 2022.

PIEROZAN, Rodrigo C. *et al.* **Geomembrana como Manta Impermeável a Montante de Barragens de Aterro - Laboratório e Estudo Numérico**. São Paulo,

2019. Disponível em: http://www.soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR42-1_003-019.pdf. Acessado em mai. de 2022.

SALINAS, J. V. **Estudo dos processos construtivos e das patologias de açudes e barragens geotécnicas de pequeno porte**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, UNIPAMPA. Alegrete, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/1985>. Acessado em fev. de 2023.

SANDOVAL, I.W. **Presas de Tierra y Enrocamento**. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Washington-Sandoval-Erazo/publication/317291138_Presas_de_Tierra_y_Enrocamiento/links/5930a836a6fcc89e7845cd9/Presas-de-Tierra-y-Enrocamiento.pdf. Acessado em jul. de 2022.

SANFONA, Pedro Miguel G. S. S. **Aplicação de Geomembranas de PVC em Barragens: Influência da Temperatura no Controlo das Soldaduras**. 2018. Tese de Doutorado – Universidade Nova de Lisboa. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/53153/1/Sanfona_2018.pdf. Acessado em jun. de 2022.

SOUZA, Mariana M. d. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9531/1/monopoli10006346.pdf>. Acessado em jun. de 2022.

TOMAZ, Plínio. **Pequenas barragens de terra**. Capítulo 88. Curso de Manejo de águas pluviais. 11 de março de 2011. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/25391749/capitulo-88-pequenas-barragens-pliniotomazcombr>. Acessado em jun. de 2022.

UNAS, Mário S. P. **Estudo Experimental e Numérico de Problemas de Percolação em Modelo Reduzido**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia, FEUP. Disponível em: <http://docplayer.com.br/69218927-Estudo-experimental-e-numerico.html>. Acessado em jul. de 2022.