

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO DO PRADO

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE DRENAGEM EM MODELOS DE
LABORATÓRIO DE BARRAGEM DE TERRA

PONTA GROSSA

2024

GUSTAVO DO PRADO

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE DRENAGEM EM MODELOS DE
LABORATÓRIO DE BARRAGENS DE TERRA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Prof.^a Dra. Bianca Penteado de
Almeida Tonus

PONTA GROSSA

2024

GUSTAVO DO PRADO

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE DRENAGEM EM MODELOS DE
LABORATÓRIO DE BARRAGENS DE TERRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Bianca Penteado de Almeida Tonus

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Eng. Civil M.Sc. Rafael Anibele – Intertechne S.A

Ponta Grossa, 30 de outubro de 2024.

AGREDECIMENTOS

Meus agradecimentos fazem referência a todos que, de alguma forma, influenciaram meu aprendizado durante o período em que estive na universidade.

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e perseverança ao longo desta jornada. No âmbito pessoal, agradeço de forma incomensurável aos meus pais, Antônio Valdemar P. Prado e Valéria M. Prado e minha irmã Beatriz do Prado. Agradeço pelo amor, apoio incondicional e ensinamentos ao longo da vida, que me conduziram até aqui. Sou grato pelo investimento na minha educação e pela formação dos meus valores, sempre prezando pela minha liberdade e felicidade e me proporcionando a oportunidade de alcançar meus objetivos. Minhas conquistas são deles e as deles, minhas.

À minha orientadora, Bianca Penteado de Almeida Tonus, pela orientação, paciência e por sempre me desafiar a buscar a excelência. Ao professor Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger, pelos ensinamentos e conselhos ao longo da minha formação.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, por fornecer o ambiente acadêmico e os recursos necessários para a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao meu amigo e laboratorista Nilson Ribeiro Bueno, pelo auxílio indispensável na construção e compatibilização do tanque de percolação, que foi crucial para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos que construí ao longo do curso, sou grato pelo incentivo, apoio, compreensão e pelos momentos de descontração, que foram essenciais para equilibrar a pressão e manter a motivação ao longo desse processo.

A todos, minha mais sincera gratidão.

*The problem is not the dams.
It is the hunger.
It is the thirst.
It is the darkness of a township.
It is township and rural huts without running water, light or sanitation.
It is the time wasted in gathering water by hand.
There is a real pressing need for power in every sense of the word.*

Nelson Mandela

Todos os rios vão para o mar, contudo, o mar nunca se enche; ainda que sempre corram para lá, para lá
voltam a correr.
(Eclesiastes)

RESUMO

As simulações numéricas e os modelos físicos visam a análise do comportamento de problemas reais, que muitas vezes não podem ser analisados diretamente no campo, permitindo o controle de variáveis. Em fenômenos como o fluxo através de barragens de terra, os efeitos bidimensionais podem ter um impacto significativo nos resultados obtidos com soluções simplificadas, influenciando a vazão, as cargas, os gradientes hidráulicos e os fatores de segurança. Este trabalho tem como objetivo principal analisar a utilização de diferentes sistemas de drenagens em modelos de barragens de laboratório, sem sistema de drenagem, com dreno de pé e com filtro vertical e tapete drenante, construídos em areia, utilizando tanto modelagem física quanto modelagem numérica. Para a modelagem física, utilizou-se um tanque de percolação em acrílico e para a modelagem numérica, foi utilizado o software GeoStudio, a partir dos módulos SEEP/W e SLOPE/W. A análise comparativa entre os diferentes sistemas de drenagem possibilitou identificar a solução de drenagem interna, destacando as vantagens e limitações de suas utilizações. A utilização de areia nos experimentos físicos mostrou-se uma solução viável, permitindo a observação de fluxos similares aos das análises numéricas. A comparação entre os métodos confirmou a eficácia dos sistemas de drenagem em reduzir pressões neutras e aumentar a estabilidade dos taludes, destacando a relevância de sua aplicação na prevenção de fenômenos como *piping*.

PALAVRAS-CHAVE: barragem de terra, sistema de drenagem, modelo de laboratório, modelagem numérica, percolação.

ABSTRACT

Numerical simulations and physical models aim to analyze the behavior of real-world problems, which often cannot be directly examined in the field, allowing for variable control. In phenomena such as flow through earth dams, two-dimensional effects can significantly impact the results obtained with simplified solutions, influencing discharge, loads, hydraulic gradients, and safety factors. The main objective of this study is to analyze the use of different drainage systems in laboratory dam models: without a drainage system, with a toe drain, and with a vertical filter and drainage blanket. These models were constructed in sand, using both physical modeling and numerical modeling. For the physical modeling, an acrylic percolation tank was used, and for the numerical modeling, the GeoStudio software was utilized, specifically the SEEP/W and SLOPE/W modules. The comparative analysis of the different drainage systems enabled the identification of internal drainage solutions, highlighting the advantages and limitations of their applications. The use of sand in the physical experiments proved to be a viable solution, allowing the observation of flows similar to those in numerical analyses. The comparison between the methods confirmed the effectiveness of drainage systems in reducing pore pressures and increasing slope stability, emphasizing the relevance of their application in preventing phenomena such as piping.

Keywords: earth dam, drainage system, laboratory model, numerical modeling, percolation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de barragem de terra.....	20
Figura 2 – Seção transversal de uma barragem de concreto à gravidade	21
Figura 3 – Estrutura de uma barragem à Montante.....	23
Figura 4 – Barramento por Linha de Centro.....	23
Figura 5 - Formas para superfícies potenciais de escorregamento; (a) ruptura circular; (b) ruptura em forma de cunha; (c) ruptura em superfície qualquer	25
Figura 6 – Representação de rede de fluxo; (a) Fluxo confinado bidirecional; (b) Linhas de fluxo e linhas Equipotenciais.	28
Figura 7 – Barragem com fluxo em condição confinada	29
Figura 8 – Barragem com fluxo em condição não confinada	29
Figura 9 – Modelo físico de barragem homogênea	34
Figura 10 – Visualização dos traçadores de linha de fluxo em meio poroso	35
Figura 11 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do processo construtivo ..	36
Figura 12 – Fluxograma construtivo das barragens para os diferentes sistemas drenantes	37
Figura 13 - Disposições estruturais e instrumentação do modelo	38
Figura 14 - Dimensões internas do tanque de percolação (cm)	38
Figura 15 - Vista lateral do tanque com a localização dos piezômetros e tirantes de reforço da estrutura (cm).....	39
Figura 16 - Tanque de percolação	40
Figura 17– Leito de secagem da areia em laboratório	41
Figura 18- Areias utilizadas na construção dos modelos de barragem; (a) Material utilizado no espaldar a jusante e a montante, (b) Material utilizado como filtro	42
Figura 19 - Geometria do modelo de barragem para os diferentes sistemas de drenagem	43
Figura 20– Ensaio de determinação do peso específico aparente seco; (a) materiais utilizados no ensaio; (b) funil extensor para a deposição da areia no modelo	46
Figura 21– Piezômetro manual; (a) Painel de medição dos piezômetros da barragem; (b) Extremidade do piezômetro com geossintético.	47
Figura 22– Disposição dos dispositivos medidores de vazão; (a) dispositivo medidor de vazão a montante, (b) Dispositivo medidor de vazão a jusante	48

Figura 23– Dispositivo para controle de nível d'água; (a) Vertedor à montante, (b) Vertedor à jusante	49
Figura 24– Sistema de elevação de água; (a) disposição hidráulica da bomba, (b) Ligação entre a bomba e reservatório de 100 L	50
Figura 25– Dissipador para descarga da vazão de projeto	51
Figura 26 – Disposição no tanque dos reservatórios dos corantes traçadores do meio granular;	52
Figura 27 – Disposição dos piezômetros ao longo do modelo	53
Figura 28 - Geometria da barragem delineada na face do tanque de percolação para modelo sem sistema de drenagem	54
Figura 29 - Geometria da barragem delineada na face do tanque de percolação para modelo com dreno de pé.....	54
Figura 30 - Geometria da barragem delineada na face do tanque de percolação para modelo com filtro vertical e tapete drenante.....	54
Figura 31– Construção do modelo de laboratório de barragem a partir da deposição do material granular e paramento de delimitação geométrica do modelo	55
Figura 32 – Enchimento do reservatório à montante sem sistema de drenagem.....	56
Figura 33 - Enchimento do reservatório à montante com dreno de pé.....	56
Figura 34 - Enchimento do reservatório à montante com filtro vertical e tapete drenante	57
Figura 35 – Janela de visualização de informações de resultados de poropressão do software GeoStudio.....	58
Figura 36 - Janela de visualização de informações de resultados de fluxo de água do software GeoStudio.....	58
Figura 37 – Condições de contorno atribuída a modelagem	59
Figura 38 – Curvas granulométricas das areias do Rio Tibagi	62
Figura 39 - Curvas de distribuição granulométricas para a areia dos filtros e dreno .	63
Figura 40 - Avaliação do peso específico aparente seco x altura de queda para a areia fina	65
Figura 41 - Avaliação do peso específico aparente seco x altura de queda para a areia média modificada	67
Figura 42 – Simulação das linhas de fluxo e equipotenciais no modelo numérico sem sistema de drenagem.....	76

Figura 43 - Modelo de laboratório de barragem sem sistema de drenagem após todas as etapas construtivas.....	77
Figura 44 - Estabilização do fluxo para o modelo de laboratório sem sistema de drenagem	78
Figura 45 - Simulação das linhas de fluxo e equipotenciais no modelo numérico com dreno de pé	79
Figura 46 - Modelo de laboratório de barragem com dreno de pé após todas as etapas construtivas	80
Figura 47 - Estabilização do fluxo para o modelo com dreno de pé.....	80
Figura 48 - Simulação das linhas de fluxo e equipotenciais no modelo numérico com filtro vertical e tapete drenante	82
Figura 49 - Modelo de laboratório de barragem com filtro vertical e tapete drenante após todas as etapas construtivas	82
Figura 50 - Estabilização do fluxo para o modelo com filtro vertical e tapete drenante	83
Figura 51 - Análise de estabilidade à montante para o modelo sem sistema de drenagem	85
Figura 52 - Análise de estabilidade à jusante para o modelo sem sistema de drenagem	86
Figura 53 - Análise de estabilidade à montante para o modelo com dreno de pé.....	87
Figura 54 - Análise de estabilidade à jusante para o modelo com dreno de pé	88
Figura 55 - Análise de estabilidade à montante para o modelo com filtro vertical e tapete drenante	89
Figura 56 - Análise de estabilidade à jusante para o modelo com filtro vertical e tapete drenante	90
Figura 57 - Análise de estabilidade parente à montante para o modelo sem sistema de drenagem	91
Figura 58 - Análise de estabilidade parente à jusante para o modelo sem sistema de drenagem	92
Figura 59 - Análise de estabilidade parente à montante para o modelo com dreno de pé	93
Figura 60 – Análise de estabilidade parente para o modelo com dreno de pé.....	94
Figura 61 – Análise de estabilidade parente para o modelo com filtro vertical e tapete drenante	95

Figura 62 - Análise de estabilidade parente para o modelo com filtro vertical e tapete drenante96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio e normas dos ensaios de laboratório	44
Tabela 2 - Propriedades das areias utilizadas.....	64
Tabela 3 – Relação entre altura de queda, Índice de vazios (e) e compactação relativa (CR) para a areia fina.....	66
Tabela 4 - Relação entre altura de queda, Índice de vazios (e) e compactação relativa (CR) para a areia média modificada.....	68
Tabela 5 – Coeficiente de condutividade hidráulica da areia fina	69
Tabela 6 – Coeficiente de condutividade hidráulica da areia modificada	69
Tabela 7 - Resultados obtidos nos ensaios para os diferentes modelos físicos construídos.....	70
Tabela 8 - Resultados obtidos nos ensaios para as diferentes modelagens numéricas	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Tipos usuais de seções em barragens de terra	20
Quadro 2– Método de análise de Equilíbrio Limite	24
Quadro 3- Fatores de Segurança requeridos pela eletrobrás	27
Quadro 4 - Dispositivos de drenagem utilizados para controle de percolação em barragens de terra.....	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	16
1.3 JUSTIFICATIVA	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 TIPOS DE BARRAGENS	18
2.1.1 Barragem de terra e/ou enrocamento	18
2.1.2 Barragem de concreto	21
2.1.3 Barragem de rejeito	22
2.2 REQUISITOS PARA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE TERRA	23
2.2.1 Condições de carregamento	26
2.3 DEFINIÇÃO DE REDE DE FLUXO E SUAS PROPRIEDADES	27
2.3.1 Análise de percolação por meio do método de rede de fluxo	28
2.3.2 Controle de percolação em barragem de terra	30
2.4 CRITÉRIOS DE RETENÇÃO	32
2.5 MODELO DE BARRAGEM DE LABORATÓRIO	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO MODELO DE BARRAGEM DE LABORATÓRIO	37
3.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	40
3.3 GEOMETRIA DO MODELO	42
3.4 ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS NAS AREIAS	44
3.5 CORRELAÇÃO ENTRE DEPOSIÇÃO DO MATERIAL E PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO DAS AREIAS	45
3.6 INSTRUMENTAÇÃO DE MODELO DE LABORATÓRIO DE BARRAGEM	46
3.6.1 Piezômetros	46
3.6.2 Dispositivos de medição de vazão	48

3.6.3 Extravasores	49
3.6.4 Sistema de bombeamento	49
3.6.5 Dissipador de energia	50
3.6.6 Traçadores de rede de fluxo	51
3.7 LEITURAS DE INSTRUMENTAÇÃO	52
3.8 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DE LABORATÓRIO DE BARRAGEM	53
3.9 ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO E ESTABILIZAÇÃO DO FLUXO	55
3.10 MODELAGEM NUMÉRICA	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 CONCEPÇÃO E ADEQUAÇÃO DAS CURVAS GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS	61
4.2 PROPRIEDADES DAS AREIAS UTILIZADAS	63
4.3 ALTURAS PARA A DEPOSIÇÃO DAS AREIAS A PARTIR MÉTODO DE CHUVA DE AREIA	64
4.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DAS AREIAS	68
4.4.1 Resultados de carga de pressão para os modelos de laboratório com diferentes sistemas de drenagem	70
4.5 VISUALIZAÇÃO DA REDE DE FLUXO PARA AS MODELAGENS NUMÉRICAS E LABORATORIAIS PARA OS DIFERENTES MODELOS	75
4.5.1 Modelo sem sistema de drenagem	76
4.5.2 Modelo com dreno de pé	78
4.5.3 Modelo com filtro vertical e tapete drenante	81
4.6 ANÁLISE DE ESTABILIDADE	83
4.6.1 Final de Construção	84
4.6.2 Regime permanente de operação	90
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1 CONCLUSÕES	96
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	97

1 INTRODUÇÃO

Barragens são obstáculos artificiais com a capacidade de reter água, rejeitos, detritos, para fins de armazenamento, controle, regularização de vazões e geração de energia, podendo variar de tamanho em maciços menores de terra a grandes estruturas de concreto (CBDB, 2019).

A construção de barragens tem como principal objetivo proporcionar benefícios significativos à sociedade. No entanto, sua construção e operação geram impactos sociais e ambientais adversos. Além disso, essas estruturas estão suscetíveis a falhas, acidentes — que envolvem o colapso parcial ou total da barragem, liberando incontrolavelmente o conteúdo do reservatório — e incidentes que comprometam a integridade da estrutura, podendo levar ao seu rompimento (World Commission on Dams, 2000).

Durante o ano de 2021 no Brasil, o último Relatório de Segurança de Barragem (RSB) documentou 13 acidentes e 37 incidentes em 16 estados brasileiros. Esses acidentes frequentemente estão associados a problemas críticos como *piping* (erosão interna), galgamento, e redução da resistência ao cisalhamento do solo (ANA, 2022). Tais falhas podem comprometer a integridade das estruturas e aumentar o risco de colapsos parciais ou totais, com consequências potenciais as comunidades e ao meio ambiente.

A erosão interna é reconhecida como uma das principais causas de ruptura em barragens. Segundo o U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2007), até a data do relatório, 49,60% das falhas registradas em barragens foram atribuídas a problemas relacionados a erosão interna. As forças induzidas pela percolação descontrolada no maciço e na fundação podem favorecer o carreamento das partículas de solo, gerando um processo de erosão regressiva, conhecido como *piping* (ICOLD, 2013).

Nesse contexto, os filtros, elementos essenciais no controle dessa erosão, são dimensionados com base em critérios de retenção e permeabilidade. Embora pareçam conflitantes, tais critérios visam evitar o *piping* ao reter partículas maiores do material protegido e permitir a passagem controlada da água. Assim, a construção de uma barragem exige um projeto técnico abrangente, que integre conhecimentos de diversas áreas da engenharia, como ressaltado por Carvalho (2008).

Assim, a construção de uma barragem necessita da formulação de um projeto técnico que contemporize conhecimentos provenientes de diversas disciplinas da engenharia, de forma a garantir que todas as partes que constituem a barragem sejam abordadas de maneira adequada do ponto de vista técnico, conforme mencionado por Carvalho (2008).

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem por objetivo geral analisar a utilização de diferentes sistemas de drenagem em modelos de laboratório de barragem de terra.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Como objetivos específicos deste trabalho, têm-se:

- Caracterizar a areia da barragem e do filtro por meio de ensaios de laboratório;
- Definir o método de deposição do material que compõe a barragem para a construção do modelo;
- Construir modelos de laboratório adotando diferentes sistema de drenagem, alterando entre uma solução sem drenagem, uma solução com dreno de pé e uma solução com filtro vertical e tapete drenante;
- Modelar numericamente o comportamento hidráulico e estabilidade dos modelos;
- Comparar os resultados obtidos entre os modelos numéricos e de laboratório, avaliando as poropressões e vazões obtidas.

1.3 JUSTIFICATIVA

O crescimento populacional projetado pela ONU (2019), que prevê um aumento de 2 bilhões de pessoas até 2050, eleva significativamente a demanda por recursos essenciais, como água e energia. Nesse contexto, as barragens assumem um papel central na infraestrutura global, não apenas como fontes de abastecimento hídrico e geração de energia, mas também para a contenção de cheias e irrigação agrícola. Esse aumento populacional, aliado à pressão sobre os recursos naturais, torna ainda mais urgente garantir a segurança e eficiência dessas estruturas.

A segurança das barragens, especialmente as de terra, é crucial, uma vez que eventos de ruptura podem gerar consequências desastrosas. Foster et al. (1998)

identificam a percolação descontrolada pelo maciço como uma das principais causas de rupturas em barragens de terra, destacando a necessidade de sistemas eficientes de controle de fluxo. Cruz (2004) corrobora essa análise, ressaltando que falhas nesses sistemas estão frequentemente associadas a acidentes graves.

Para mitigar os riscos de erosão interna e percolação, o *ICOLD Bulletin 164* (2013) fornece diretrizes sobre o uso de materiais de baixa permeabilidade e a incorporação de sistemas de drenagem adequados. Essas práticas são essenciais para garantir a integridade estrutural e evitar a saturação excessiva, que pode comprometer a estabilidade da barragem. O correto dimensionamento e o uso de materiais apropriados, assim como a manutenção constante, são medidas fundamentais para garantir a longevidade e a segurança dessas estruturas, em especial diante das crescentes demandas de uma população em expansão.

A construção de modelos laboratoriais e a modelagem numérica são ferramentas indispensáveis para compreender e prever o comportamento de barragens em condições reais. Como Ferreira (2008) argumenta, esses métodos permitem a comparação entre dados projetados e resultados obtidos experimentalmente, proporcionando uma análise mais aprofundada da eficiência dos sistemas de drenagem e suas implicações na segurança da barragem.

Conclui-se, portanto, que este estudo é justificado pela necessidade premente de aprimorar as práticas de engenharia em barragens de terra. Ao investigar diferentes sistemas de drenagem em condições controladas, busca-se não apenas prevenir falhas estruturais, mas também otimizar os processos construtivos e reforçar a segurança das barragens, prevenindo problemas associados à erosão interna, um dos principais fatores de risco nessas obras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será abordado cada tipo de barragem, incluindo suas características específicas. Esta análise fornecerá uma visão abrangente sobre as aplicações e a relevância de cada tipo de barragem. Particularmente, o trabalho terá um foco especial nas barragens de terra, explorando suas especificidades. Além disso, serão examinados os diferentes sistemas de drenagem utilizados em barragens de terra, com ênfase na importância desses sistemas para a manutenção dessas estruturas.

2.1 TIPOS DE BARRAGENS

As barragens são estruturas projetadas para a contenção de água, desempenhando funções essenciais na gestão de recursos hídricos, controle de inundações e geração de energia. Elas podem ser classificadas de várias maneiras, dependendo dos materiais utilizados e do método de construção. Entre os tipos mais comuns estão as barragens de terra, enrocamento, concreto e rejeito (ICOLD, 2018; U.S. Bureau of Reclamation, 2019; United States Army Corps of Engineers, 2018).

Barragens de terra são construídas a partir de solo compactado e são conhecidas por sua rapidez e economia na construção. As barragens de enrocamento, por sua vez, utilizam grandes blocos de pedra, sendo uma solução robusta para áreas onde é necessária maior resistência estrutural e estabilidade contra forças externas, como variações climáticas e hidrológicas intensas. As barragens de concreto são robustas e projetadas para suportar pressões hidrostáticas significativas. Finalmente, barragens de rejeito são formadas com resíduos de mineração e são uma solução econômica em contextos específicos (ICOLD, 2018; U.S. Bureau of Reclamation, 2019).

2.1.1 Barragem de terra e/ou enrocamento

De acordo com Massad (2010), as barragens de terra primitivas eram de material “homogêneo”, transportado manualmente e compactado por animais ou homens. Em 1820, Telford iniciou o uso de núcleo de argila garantindo a estanqueidade das barragens. Embora haja diversas descrições históricas de construções de barragens de terra e enrocamento, os processos racionais da engenharia ao estudo e projeto de barragens de terra tiveram início em meados do século XIX e início do século XX, a partir do desenvolvimento da Mecânica dos Solos (Esteves, 1964).

De acordo com Mello (1975), uma barragem deve ser analisada como uma estrutura orgânica no espaço, abrangendo vários componentes essenciais para sua funcionalidade e segurança. Esses componentes incluem a bacia da represa, a fundação e as estruturas auxiliares, como vertedouros, descarregadores de fundo, tomadas d'água, galerias, túneis e casas de força. Além disso, a instrumentação é crucial para monitorar a performance da barragem e deve incluir piezômetros e medidores de nível d'água, recalque, vazão e deslocamento, além de instalações para comunicação e manutenção.

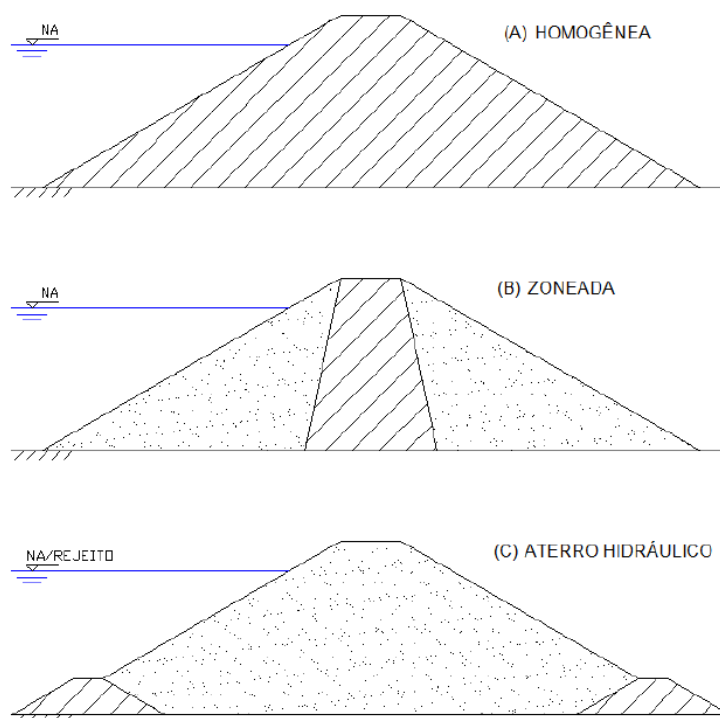
Uma das principais preocupações na construção de barragens de terra é o fenômeno conhecido como *piping* ou erosão regressiva tubular. Massad (2010) destaca que este problema ocorre quando as partículas de solo são carregadas pela água em fluxo, formando cavidades que podem comprometer a integridade da estrutura. Para mitigar o risco de *piping*, é fundamental controlar a percolação da água através da barragem. No aterro, esse controle é frequentemente realizado por meio de filtros, que interceptam o fluxo de água e previnem a saída de partículas na face do talude ou ombreira à jusante. Esses filtros são geralmente constituídos de areia ou material granular com granulometria adequada para evitar o carregamento de solo.

Além das barragens de terra, existem também as barragens de enrocamento, que são construídas com rochas fragmentadas e frequentemente possuem um núcleo composto por material de baixa permeabilidade. Em algumas situações, especialmente quando recursos naturais são limitados, pode-se optar por substituir o núcleo de baixa permeabilidade por uma membrana de concreto ou asfalto na face montante da barragem (Smith, 2015).

As barragens de terra convencionais podem possuir seções homogêneas, zoneadas ou de aterro hidráulico, como ilustrado na Figura 1. As seções homogêneas são compostas de um único tipo de material, e embora tradicionalmente não incluam drenagem interna, conceitos modernos de engenharia podem incorporar sistemas de drenagem interna para melhorar a segurança e a funcionalidade (Vick, 1990).

Por outro lado, as seções zoneadas utilizam diferentes materiais distribuídos em zonas distintas para otimizar a resistência e a impermeabilidade. As seções de aterro hidráulico são geralmente constituídas por areia e envolvem a deposição controlada de material em um processo hidráulico, formando uma estrutura com zonas de filtro e drenagem para garantir a estabilidade (Vick, 1990).

Figura 1 – Tipos de barragem de terra



Fonte: Pierozan (2014).

O Quadro 1, por sua vez, fornece uma descrição detalhada dos principais tipos de seções empregadas em barragens de terra, destacando suas características, vantagens e aplicações específicas.

Quadro 1- Tipos usuais de seções em barragens de terra

TIPO	DESCRIÇÃO	UTILIZAÇÃO
Homogênea	Seção transversal constituída por apenas um tipo de material.	Em locais onde as áreas de empréstimo não apresentam grandes variações em relação ao tipo do material (GAIOTO, 2003).
Zoneada	Seção transversal constituída por zonas distintas de materiais argilosos e granulares.	Quando há facilidade de se explorar as áreas de empréstimo de forma discriminada em relação aos materiais argilosos e granulares (GAIOTO, 2003).
Aterro hidráulico	A construção de diques por meio de hidromecanização, que engloba a exploração, transporte e deposição de solo em áreas determinadas com o uso de água.	Aterro de grandes áreas, como por exemplo aeroportos, estradas e zonas comerciais e residenciais, além da construção de barragens e diques (CRUZ, 1996).

Fonte: Adaptado de Pierozan (2014).

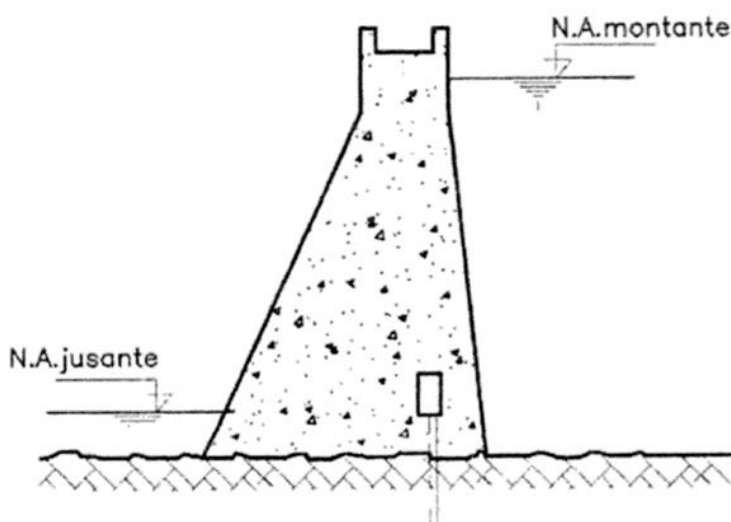
2.1.2 Barragem de concreto

De acordo com Moliterno (1995), as barragens são classificadas por meio do material que as compõem, barragens de material aglomerante são constituídas de concreto, sendo este: simples, armado, protendido ou rolado.

Segundo Gusmão Filho (2006), as barragens de concreto são classificadas em: barragem de gravidade, contraforte ou arco. Barragens de concreto à gravidade, possuem seção trapezoidal, eixo em linha reta ou com uma pequena curvatura em direção à montante.

A partir da Figura 2 é possível observar a configuração típica das barragens de concreto à gravidade, que apresentam uma seção transversal trapezoidal e um eixo predominantemente reto ou com uma leve curvatura em direção à montante.

Figura 2 – Seção transversal de uma barragem de concreto à gravidade



Fonte: Gusmão (2006).

As barragens de concreto à gravidade são definidas de acordo com o US Army Corps of Engineers (1995), como estruturas sólidas de concreto que possuem sua estabilidade contra as cargas que está sujeita, devido sua forma, massa e resistência do concreto.

Para Gusmão Filho (2006), barragens de contraforte são estruturas que consistem em uma placa de concreto armado, acompanhadas de contrafortes à jusante, que redistribuem os esforços recebidos pela placa, que apresentam tensões elevadas, direcionadas à fundação. Este tipo de barragem requer menor volume de concreto se comparada com a barragem de concreto simples, como também, melhorias no efeito

de subpressão, devido à pequena área da base em contato com o maciço rochoso (Massad, 2010).

Barragens de arco são compostas de uma parede única em concreto, curva em planta, com sua face convexa à jusante. Conforme Faria (1988), do ponto de vista estrutural, uma barragem do tipo abóboda é uma casca que se liga, ao longo do respectivo contorno inferior, a um maciço de fundação rochoso.

De acordo com Moliterno (1995), esta barragem apresenta vantagem econômica, pois suporta esforços de compressão em sua estrutura. No entanto, sua construção requer uma análise extensa de cálculos estruturais e considerações geológicas diretas.

2.1.3 Barragem de rejeito

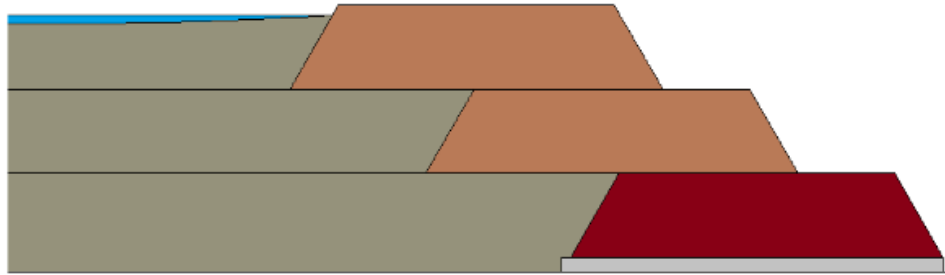
De acordo com Duarte (2008), barragens de rejeito são estruturas capazes de armazenar rejeitos decorrentes do processo de mineração, tendo isso como fator que a diferencia das barragens para obras civis. Esses rejeitos são compostos por partículas finas de minerais não aproveitáveis misturadas com água, resultando em uma pasta que precisa ser gerida de maneira segura e eficiente.

De acordo com Vick (1990), o projeto de uma barragem de rejeito deve levar em consideração diversos fatores críticos, incluindo a estabilidade geotécnica, a gestão de água e os métodos de disposição dos rejeitos. Estudos indicam que a implementação de sistemas de drenagem adequados e a redução do conteúdo de água nos rejeitos, por meio de processos de desaguamento, podem melhorar significativamente a segurança das barragens (Rico et al., 2008).

O alteamento a montante é o método mais econômico, no qual os novos níveis são construídos sobre os rejeitos depositados, utilizando-os como base. Apesar da economia, este método apresenta maior risco de instabilidade devido à menor resistência dos rejeitos compactados (Rico et al., 2008).

Este processo é apresentado na Figura 3, onde é possível observar como as camadas sucessivas de rejeitos formam a base para novos níveis de alteamento.

Figura 3 – Estrutura de uma barragem à Montante

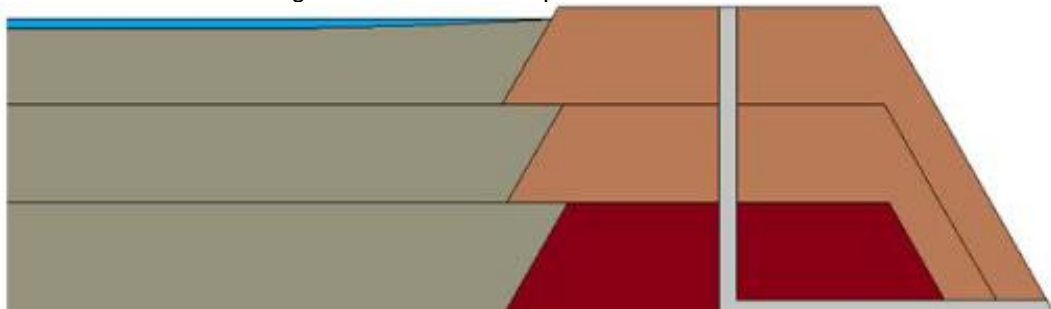


Fonte: Cardozo *et al.* (2016).

Por outro lado, o alteamento por linha de centro envolve a construção de novos níveis diretamente sobre o eixo central da barragem existente. Este método combina a estabilidade proporcionada pelo alteamento à jusante, que se expande em direção à jusante, com a economia de materiais, resultando em uma solução intermediária em termos de custo e segurança.

A linha de centro mantém o centro de gravidade alinhado com a estrutura original, proporcionando uma estabilidade superior ao alteamento à montante e reduzindo os riscos de falhas catastróficas (Vick, 1990). Este processo é ilustrado na Figura 4, que demonstra como a construção sobre o eixo central da barragem existente ajuda a manter a integridade estrutural, distribuindo melhor as tensões e minimizando os riscos de instabilidade.

Figura 4 – Barramento por Linha de Centro.



Fonte: Cardozo *et al.* (2016).

2.2 REQUISITOS PARA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE TERRA

A análise da estabilidade de taludes é predominantemente realizada através do método do equilíbrio limite, conforme descrito por Massad (2010). Este método é amplamente utilizado para avaliar superfícies de deslizamento circulares, comuns em taludes não reforçados, como em barragens, ou em taludes contidos. A resolução desses problemas geralmente se dá por meio do método das fatias, onde a massa de

solo, à beira do escorregamento, é dividida em fatias ou lamelas. A partir dessas subdivisões, calcula-se as forças, momentos e tensões atuantes, permitindo uma análise detalhada das condições de estabilidade (Duncan & Wright, 2005; USACE, 2003).

Comumente, os métodos de Equilíbrio Limite, utilizam uma superfície de ruptura para o cálculo do coeficiente de segurança. A análise dos métodos disponíveis, dependem de fatores como: geometria do maciço, estratigrafia, materiais envolvidos (Tonus, 2009).

De acordo com as análises apresentadas no Quadro 2, pode-se observar que cada método tem características próprias quanto à precisão, complexidade e aplicabilidade.

Quadro 2– Método de análise de Equilíbrio Limite

Método de Equilíbrio Limite	Método do Círculo de Atrito	Método de Fellenius	Método de Bishop Simplificado	Método de Morgenstern-Price
Características	Método simples e gráfico, útil para solos com propriedades homogêneas.	Método clássico, assume que todas as forças de resistência atuam no círculo deslizante.	Método mais preciso que o de Fellenius, inclui forças interslice verticais.	Método mais completo, considera tanto forças verticais quanto horizontais entre as fatias. Ideal para solos complexos.
Aplicabilidade	Usado para taludes simples e homogêneos.	Adequado para taludes homogêneos e análises preliminares.	Aplicado em análise de estabilidade de taludes complexos.	Indicado para taludes com condições de solo mais variáveis e complexas.
Vantagens	Fácil de aplicar e interpretar.	Simplicidade e facilidade de uso.	Maior precisão em relação ao método de Fellenius.	Alta precisão, adequado para condições geotécnicas complexas.
Desvantagens	Menos preciso para solos não homogêneos ou condições complexas.	Desconsidera forças interslice, o que pode levar a resultados menos precisos.	Método simplificado, não considera forças horizontais entre as fatias.	Mais complexo e requer maior esforço computacional.

Fonte: DAS (2010), CRAIG (1997), U.S. Army Corps of Engineers (2003).

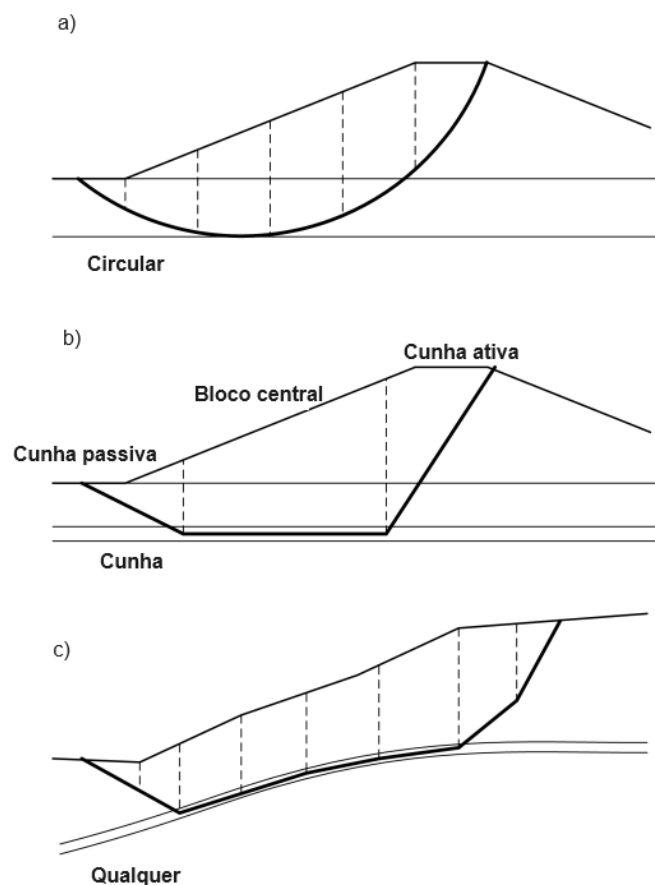
Na análise de estabilidade de taludes, os métodos de equilíbrio limite são amplamente utilizados para avaliar superfícies de ruptura potenciais, como as representadas na Figura 5. Cada método possui características específicas que os tornam mais adequados para diferentes tipos de superfícies de escorregamento.

Superfícies de ruptura circulares (Figura 5 (a)) são frequentemente analisadas com métodos como o de Fellenius e o de Bishop Simplificado. O método de Fellenius, sendo mais simples, é eficaz para superfícies homogêneas, enquanto o método de Bishop Simplificado é capaz de considerar forças verticais, proporcionando maior precisão em superfícies circulares.

Por outro lado, superfícies de ruptura em forma de cunha (Figura 5 (b)), típicas de materiais com descontinuidades, exigem métodos mais complexos, como o de Morgenstern-Price. Este método leva em consideração tanto forças verticais quanto horizontais entre fatias, sendo capaz de analisar superfícies de ruptura com geometrias mais complexas.

Finalmente, para superfícies de ruptura qualquer (Figura 5 (c)), que envolvem múltiplas inclinações e são frequentemente encontradas em materiais anisotrópicos, o método de Morgenstern-Price é considerado o mais robusto para este tipo de superfície de ruptura.

Figura 5 - Formas para superfícies potenciais de escorregamento; (a) ruptura circular; (b) ruptura em forma de cunha; (c) ruptura em superfície qualquer



Fonte: adaptada de USACE (2003).

2.2.1 Condições de carregamento

As barragens representam uma parte fundamental da infraestrutura de engenharia civil. Essas estruturas são projetadas para suportar uma variedade de condições de carregamento ao longo de sua vida útil, o que inclui pressões hidrostáticas da água armazenada, o peso próprio do material de construção e impactos de eventos sísmicos.

Durante o final de construção, a barragem de terra está sujeita a cargas relacionadas principalmente ao excesso de poropressão construtiva, e não necessariamente à pressão hidrostática máxima da água armazenada. Esta fase crítica exige cuidados especiais com a compactação final do solo e a estabilização dos taludes para garantir a integridade estrutural e evitar problemas associados ao excesso de poropressão, que pode comprometer a estabilidade da barragem (Vick, 1990).

No regime permanente ou operacional, a barragem enfrenta cargas estáveis, incluindo a pressão hidrostática da água mantida em um nível constante. Além disso, o peso próprio da água e quaisquer sobrecargas, como equipamentos ou estruturas sobre a barragem, devem ser considerados para garantir a estabilidade a longo prazo (Fell et al., 2014).

Além disso, o rebaixamento rápido, caracterizado pela descarga rápida de água da barragem, pode resultar em significativas cargas dinâmicas. Este cenário demanda uma análise minuciosa da resistência da barragem e das condições de drenagem, visando mitigar erosões e instabilidades nos taludes (ICOLD, 2019).

A ocorrência de eventos sísmicos introduz cargas dinâmicas adicionais, como acelerações sísmicas e efeitos de liquefação do solo. O projeto sísmico de barragens de terra envolve técnicas avançadas para garantir a resistência estrutural e minimizar os danos em caso de terremotos (USACE, 2000).

Assim, os taludes do reservatório devem apresentar estabilidade sob condições de precipitações elevadas, carregamentos sísmicos, rebaixamento rápido do lençol e qualquer outra situação que ameace a ruptura da estrutura e coloque em risco a segurança.

Para a verificação da segurança dos taludes de barragens de terra, recomendam-se os fatores de segurança requeridos pela Eletrobrás e publicados pelo CBDB (2003) para o projeto de usinas hidrelétricas. O Quadro 3 resume os fatores

mínimos de segurança que são normalmente aceitáveis para barragens de acordo com os critérios de projetos da Eletrobrás (2003).

Quadro 3- Fatores de Segurança requeridos pela eletrobrás para projeto de Usinas hidrelétricas

Caso	Coefficiente de segurança	Observações
Final de construção	1,3	Taludes Montante e Jusante; Valor mínimo para solos dilatantes;
Rebaixamento rápido	1,1 a 1,3	Valor máximo para solos que contraem no cisalhamento
Percolação Estável	1,5	Talude jusante
Análise Sísmica	1,1	Taludes montante e jusante

Fonte: CBDB (2003).

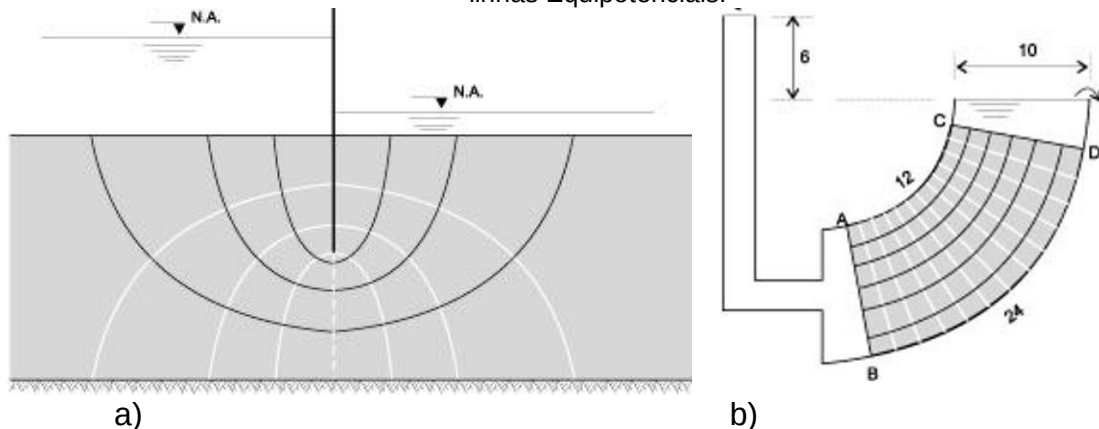
2.3 DEFINIÇÃO DE REDE DE FLUXO E SUAS PROPRIEDADES

A trajetória que o fluido percorre através do meio saturado é denominada de linha de fluxo. Em regime laminar, apresenta trajetória bem definida, de modo que não haja a intercepção das linhas de fluxo. O início do percurso de uma linha de fluxo é representado por uma carga total. Durante o trajeto há a perda de carga, isso porque com o atrito das partículas de fluido com os grãos de solo há a dissipação gradativa da carga (Massad, 2010).

Além disso, ao longo de cada linha de fluxo, há pontos onde a carga total apresenta uma parte da carga ainda disponível. A linha que une estes pontos é denominada de linha equipotencial. Cada linha equipotencial define a distribuição de carga hidráulica e as poropressões do fluido no maciço de solo (Massad, 2010).

A Figura 6 apresenta a rede de fluxo no solo, bem como a condição de percolação, constituída por linhas de fluxos e equipotenciais.

Figura 6 – Representação de rede de fluxo; (a) Fluxo confinado bidirecional; (b) Linhas de fluxo e linhas Equipotenciais.



Fonte: Pinto (2000).

2.3.1 Análise de percolação por meio do método de rede de fluxo

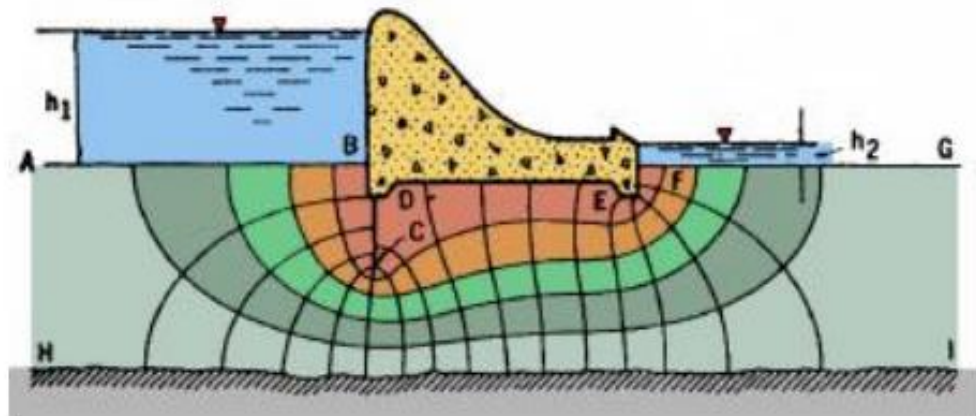
De acordo com Casagrande (1937), a rede de fluxo é o método comumente utilizado para determinação do comportamento de fluxo em barragens. Isso porque, ao exercer força à um fluido em meio poroso, as partículas tendem a fluir por meio dos poros interconectados do solo, formando caminhos de fluxo. Sendo assim, a rede de fluxo ilustra a representação deste caminho no interior do maciço.

Inicialmente, para a resolução de problemas de fluxo em barragens, é necessário estabelecer as condições de contorno que limitam a rede de percolação. Segundo Cedergren (1989), o fluxo em um meio poroso pode ser definido em duas condições: confinado, com linha freática conhecida e condição de contorno fixa, e não confinado em que ao menos duas das condições de contorno são conhecidas, sendo uma delas a linha freática.

No contexto de fluxo confinado, conforme ilustrado na Figura 7, a percolação ocorre dentro da fundação, estabelecendo claramente os pontos de entrada e saída do fluxo. Isso simplifica a imposição das condições de contorno, que correspondem a:

- I. AB - a fronteira entre a água e o solo da fundação permeável;
- II. HI - a interface entre o solo da fundação permeável e o solo impermeável;
- III. FG - a fronteira entre o solo da fundação permeável e o ar (linha de descarga).

Figura 7 – Barragem com fluxo em condição confinada

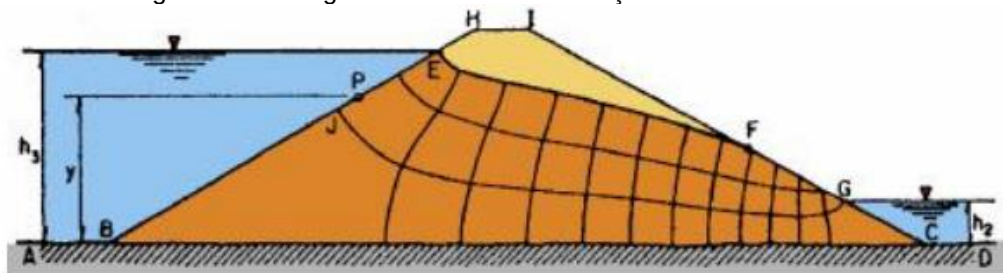


Fonte: Araújo (2013).

No caso de fluxo não confinado, conforme ilustrado na Figura 8, a percolação ocorre através do maciço do solo. Nesse contexto, é conhecido o ponto de entrada do fluxo, mas não o ponto de saída, assim como a posição da linha freática dentro do maciço. As condições de contorno correspondem a:

- I. AB - a fronteira entre a água e o solo da fundação impermeável;
- II. AC - a interface entre o solo da barragem permeável e o solo da fundação impermeável;
- III. BE - a fronteira entre o solo da barragem permeável e a água.
- IV. EF e FG - representam condições desconhecidas.

Figura 8 – Barragem com fluxo em condição não confinada



Fonte: Araújo (2013).

De acordo com Araújo (2013), após a determinação das condições limites, apenas uma rede única pode ser desenhada para satisfazer as condições estabelecidas. Se alguma dessas condições for modificada, será necessário redefinir a rede de fluxo.

2.3.2 Controle de percolação em barragem de terra

A drenagem eficiente é uma das principais medidas preventivas para garantir a segurança e estabilidade de barragens, especialmente de terra. De acordo com Cruz (1996), sistemas de drenagem bem projetados controlam os fluxos preferenciais e evitam concentrações de água que podem gerar pressões internas elevadas, levando à erosão interna. A regulação do fluxo drenado, tanto da estrutura principal quanto da fundação, contribui diretamente para reduzir o risco de falhas catastróficas, como a erosão por "piping", que pode ser provocada por filtros mal executados ou obstruídos (Araújo, 2013).

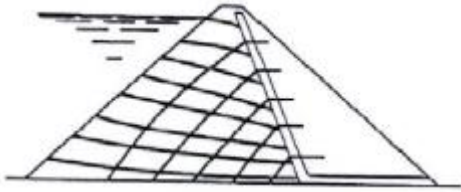
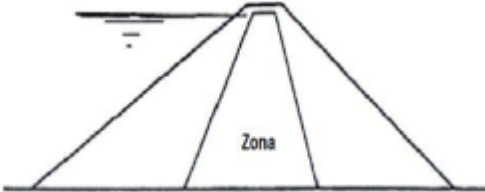
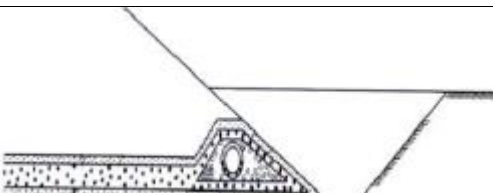
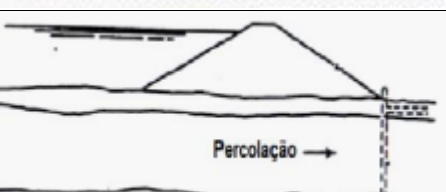
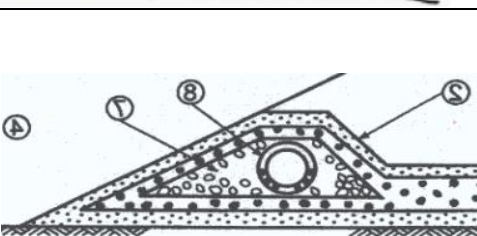
Além da correta implementação dos filtros, é essencial considerar a seleção apropriada de materiais. Conforme recomendado por Foster et al. (2000), os critérios de filtragem devem garantir que as partículas do solo sejam adequadamente retidas enquanto permitem a passagem do fluxo de água, prevenindo a erosão regressiva no maciço da barragem. A obstrução dos filtros, como destaca Araújo (2013), pode ser causada por um dimensionamento incorreto ou pela utilização de materiais inadequados, o que compromete a permeabilidade e a eficácia do sistema de drenagem.

A escolha de sistemas de drenagem deve ser feita com base em uma análise criteriosa das condições geotécnicas e hidrológicas do local. Segundo Silva (2015), é fundamental que os valores de permeabilidade dos filtros sejam compatíveis com as exigências do projeto, assegurando que não ocorra o bloqueio do fluxo de água. O uso de técnicas como a modelagem numérica e a construção de modelos laboratoriais para avaliar o comportamento dos sistemas de drenagem em situações reais tem se mostrado eficaz para prever possíveis problemas de percolação e garantir a estabilidade da estrutura ao longo do tempo (Ferreira, 2008).

Outro aspecto importante, como sugere Fell et al. (2005), é a manutenção contínua desses sistemas, já que a eficiência dos filtros pode ser comprometida ao longo do tempo devido à sedimentação ou ao acúmulo de detritos. Portanto, além da correta instalação, o monitoramento regular e a execução de medidas de manutenção preventiva são essenciais para garantir a longevidade e o desempenho do sistema de drenagem de barragens.

Os principais dispositivos de drenagem utilizados no controle de percolação através do maciço de barragens são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Dispositivos de drenagem utilizados para controle de percolação em barragens de terra

DISPOSITIVO DE DRENAGEM	DESCRIÇÃO	GEOMETRIA
Dreno chaminé (vertical ou inclinado)	Fica localizado entre o núcleo e o talude de jusante. Tem como objetivo interceptar todo o fluxo horizontal e manter não-saturada a zona do espaldar de jusante.	
Barragem zoneada	Possuem diferentes zonas com materiais de permeabilidade distinta, podendo ou não conter uma seção interna impermeável (núcleo).	
Tapete drenante horizontal	Tem a função de conduzir para o pé de jusante da barragem as águas coletadas pelo dreno chaminé e as percoladas pela fundação., como objetivo de proteger o maciço contra os efeitos da erosão interna.	
Dreno de pé	Fica localizado no pé do talude de jusante, paralelo ao eixo da barragem. Sua função é coletar as águas percoladas pelo dreno chaminé e tapete drenante.	
Trincheira drenante	Intercepta o fluxo de água através de camadas permeáveis mais superficiais da fundação.	
Poço de alívio	É utilizado quando as camadas abaixo da barragem são muito profundas e inviabilizam a implantação de cut-offs. Tem a função de aliviar as pressões no maciço.	
Drenos franceses	Drenos lineares, transversais ao eixo da barragem, com determinado espaçamento entre si. Tem a função de coletar e transportar as águas percoladas pelo interior do maciço, aliviando as pressões geradas e mantendo a estabilidade do talude de jusante.	

Fonte: Adaptado de Gaioto (2003); Cedergren (1989); Pacheco (1981); Quintas (2002).

2.4 CRITÉRIOS DE RETENÇÃO

Sempre que houver uma interface entre dois materiais porosos granulares, com fluxo de água do material mais fino para o mais grosso, ocorrerá inevitavelmente algum transporte de partículas (Araújo, 2013).

De acordo com Cruz (1996), na zona de material de base, há algumas partículas ou grãos de tamanho fino e médio que são transportados para os vazios do filtro. As partículas maiores são retidas quando o diâmetro do poro se torna maior do que a partícula. As partículas finas passam, mas à medida que as partículas maiores são retidas, elas começam a reter as partículas menores. Após algum tempo, esse processo se estabiliza.

O critério de retenção se refere à prevenção deste transporte de material fino do maciço que possa acarretar a colmatção dos filtros e consequentemente a ruptura da barragem por *piping* (Araújo, 2013).

A partir dos princípios estabelecidos por Terzaghi, este sugeriu que a seleção dos materiais para a composição dos filtros atendesse a duas condições:

Critério 1 – Estabelece que os espaços vazios no material filtrante devem ser pequenos o suficiente para reter as partículas maiores do material protegido. Nesse contexto, considera-se que 15% das partículas do filtro (D_{15}) não devem exceder quatro ou cinco vezes o tamanho de 85% das partículas do solo protegido (D_{85}).

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{85(S)}} \leq 4 \text{ a } 5 \quad \text{Equação 1}$$

Critério 2 – Estabelece que o material filtrante deve possuir alta condutividade hidráulica para evitar a geração de grandes forças de percolação e pressões hidrostáticas sobre os filtros. Assim, considera-se que 15% das partículas do filtro (D_{15}) devem ser quatro ou cinco vezes maiores que 15% das partículas do solo protegido (D_{15}).

$$\frac{D_{15(F)}}{D_{15(S)}} \geq 4 \text{ a } 5 \quad \text{Equação 2}$$

Estudos conduzidos pela Marinha dos Estados Unidos (U.S. Navy, 1977) estabeleceram as seguintes condições para evitar o deslocamento das partículas do solo protegido:

$$\frac{D_{15}(F)}{D_{85}(S)} \leq 5; \quad \frac{D_{50}(F)}{D_{50}(S)} \leq 25; \quad \frac{D_{15}(F)}{D_{15}(S)} \leq 20 \quad \text{Equação 3}$$

2.5 MODELO DE BARRAGEM DE LABORATÓRIO

A utilização de modelos de barragem em laboratório na engenharia geotécnica apresenta diversas vantagens, permitindo a simulação de fenômenos complexos sob condições controladas. O tanque de percolação, equipamento laboratorial de caráter didático, permite o estudo da percolação em modelo reduzido de escoamentos bidimensionais. Essa abordagem oferece um ambiente onde é possível avaliar variáveis como: carga, vazão, permeabilidade, umidade, temperatura, que podem ser ajustadas, possibilitando a análise minuciosa de mecanismos que influenciam o comportamento de barragens.

De acordo com Anibele (2022), a construção, operação e auscultação de seções de barragens em modelos de laboratório, estão direcionadas a aquisição de dados, tais como: poropressões e vazão unitária. Ademais, estes modelos auxiliam na verificação da rede de fluxo estabelecida na seção, bem como a identificação da existência ou não de fluxos preferenciais no maciço. Estes podem ser calibrados, em diferentes escalas, por meio da análise comparativa, desde que obedecem as condições de contorno, drenagem, imposições de carregamento semelhantes tanto em modelo numérico quanto em modelo laboratorial.

O estudo experimental de barragens de terra por meio de modelos de laboratório tem se mostrado uma técnica eficaz para avaliar o comportamento desses sistemas sob diferentes condições de carregamento. Segundo Vick (1990), o uso de modelos físicos em laboratório permite a observação direta dos fenômenos de fluxo de água, deformações e rupturas, proporcionando uma compreensão detalhada dos mecanismos envolvidos na estabilidade das barragens de terra.

Além disso, a definição da escala dos modelos deve seguir adequados critérios de semelhança, garantindo que as leis físicas pertinentes sejam fielmente reproduzidas no modelo de laboratório. De acordo com Barata (2009), a aplicação precisa dessas leis é fundamental para que os resultados obtidos em laboratório possam ser extrapolados de maneira confiável para a escala real, permitindo assim a validação dos critérios de projeto e a previsão confiável do comportamento das barragens.

Segundo Dell'Avanzi et al. (2004), é possível realizar uma análise dos parâmetros de escala que devem ser levados em conta na modelagem, particularmente no contexto do fluxo não saturado e da sucção matricial. Além disso, a pesquisa de Marques e Unas (2010), também emprega modelos de laboratório de barragens de terra para investigar a percolação (Figura 9). Este avalia o potencial de implementação de diferentes geometrias e posições de filtros. Os resultados obtidos por meio da análise experimental demonstraram concordância com os valores estimados pelo modelo numérico.

Figura 9 – Modelo físico de barragem homogênea



Fonte: Marques e Unas (2010).

Segundo Unas (2008), durante muito tempo, a visualização dos fluxos foi a principal ferramenta disponível para analisar o movimento dos fluidos. Atualmente, essa técnica experimental tem sido empregada na interpretação do transporte de massa, quantidade de movimento e energia, contribuindo assim para o avanço do conhecimento na área da mecânica dos fluidos. Os fluxos laminares bidimensionais em meios porosos são investigados através do conceito de rede de percolação, composta por linhas equipotenciais e linhas de fluxo.

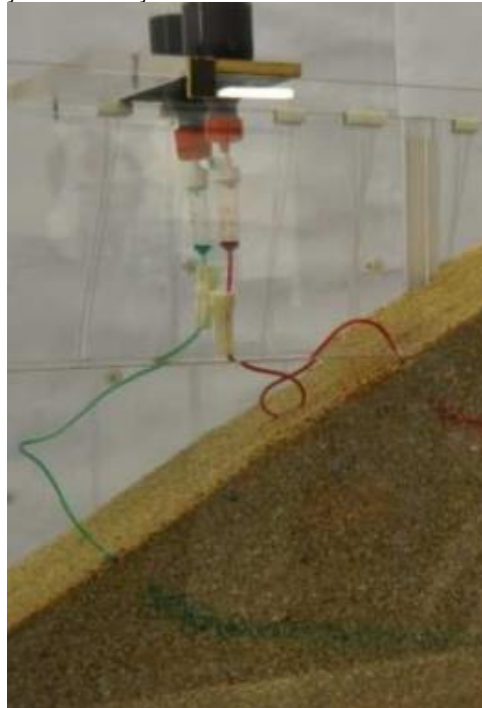
Estudos recentes têm demonstrado que os traçadores são eficazes para analisar fluxos laminares bidimensionais, sendo amplamente utilizados na modelagem de águas subterrâneas e no monitoramento da percolação em barragens de terra (Kovács & Szögi, 2014).

Gondwe et al. (2012) enfatizam a aplicação de traçadores em estudos de percolação para entender melhor a dinâmica interna das barragens de terra e

desenvolver estratégias de mitigação eficazes. Esses métodos são essenciais para assegurar a integridade e a longevidade das barragens, fornecendo dados críticos para a manutenção e a gestão dessas estruturas.

Os traçadores, indicados na Figura 10, permitem uma visualização detalhada dos fluxos de água em barragens de terra, facilitando a identificação de trajetórias de percolação.

Figura 10 – Visualização dos traçadores de linha de fluxo em meio poroso



Fonte: Unas (2008).

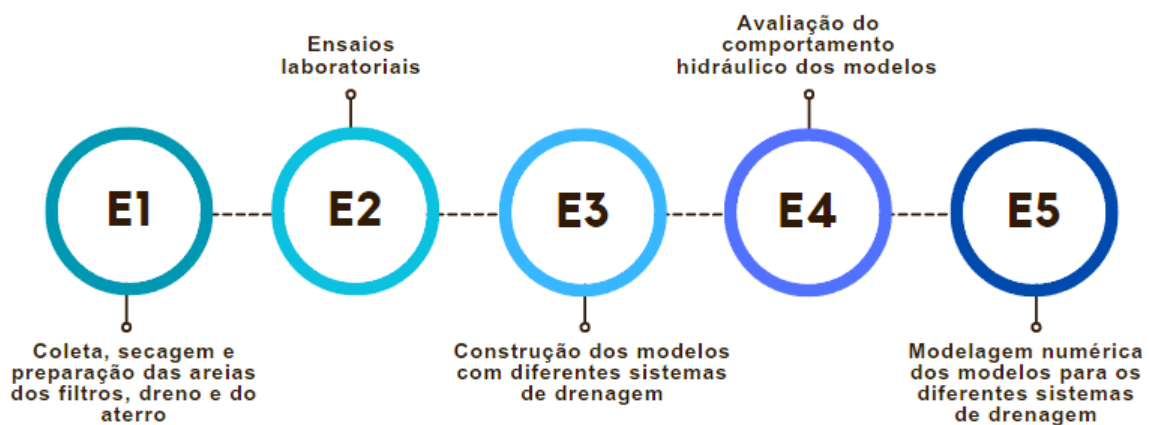
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem por objetivo analisar os diferentes sistemas de drenagem em modelos de laboratório de barragem de terra. Foram construídos três modelos distintos utilizando areia com duas gradações, sendo uma areia de granulometria fina para o aterro e uma areia de granulometria média para os filtros e drenos, adequada aos critérios de filtro de Terzaghi. Os sistemas de drenagem foram construídos seguindo a seguinte sequência: o primeiro modelo foi construído sem sistema de drenagem; o segundo modelo incluiu um dreno de pé; e o terceiro modelo contou com a composição de um filtro vertical e tapete drenante.

Para isso, realizou-se a montagem dos modelos de laboratório de barragem em areia, nas dependências da UEPG - Bloco E, no Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas. Os modelos têm como objetivo avaliar o comportamento hidráulico, bem como a percolação de barragens de terra.

O fluxograma apresentado na Figura 11, descreve as etapas, desde a coleta dos materiais até a modelagem computacional dos modelos, que serão abordadas no presente item.

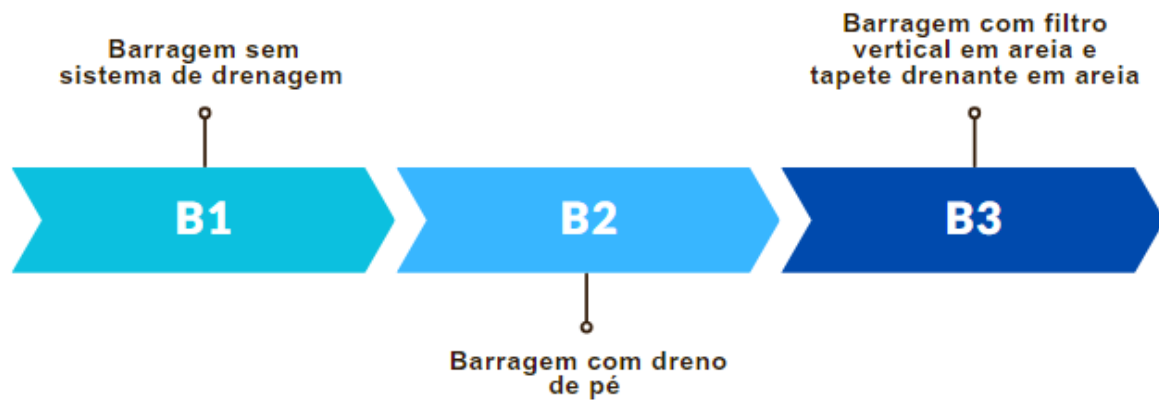
Figura 11 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento do processo construtivo



Fonte: O autor (2024).

Ademais, o fluxograma ilustrado na Figura 12 exibe a sequência temporal desde o modelo laboratório de barragem sem drenagem até os diferentes sistemas de drenagem utilizados na construção dos três modelos de laboratório de barragem de terra deste trabalho.

Figura 12 – Fluxograma construtivo das barragens para os diferentes sistemas drenantes



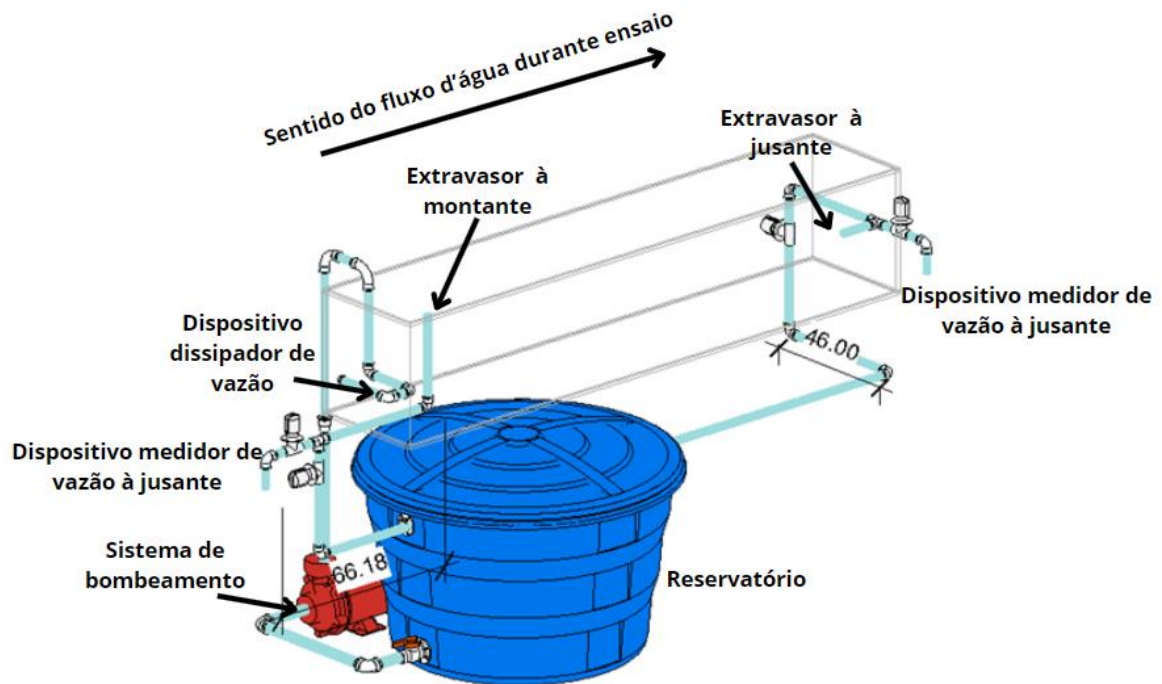
Fonte: O autor (2024).

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO MODELO DE BARRAGEM DE LABORATÓRIO

Nesta seção, são detalhados os materiais e métodos empregados na construção dos modelos de laboratório, a partir da adequação um tanque de percolação e um reservatório de água aos critérios necessários de ensaio. Esses componentes são fundamentais para simular a interação entre o fluxo de água e as estruturas dos modelos de laboratório, permitindo a análise de variáveis como percolação, poropressão e vazão.

O tanque de percolação é construído com cantoneira de ferro e placas de acrílico transparente. O tanque possui perfurações destinadas à instalação de piezômetros na parede paralela ao eixo principal, além de dois sistemas de tirantes projetados para suportar cargas horizontais na parede central do tanque. Adicionalmente, há um sistema de extravasores posicionados nas regiões perpendiculares ao eixo principal. A Figura 13 ilustra detalhes adicionais do tanque como a localização dos extravasores, medidores de vazão.

Figura 13 - Disposições estruturais e instrumentação do modelo



Fonte: O autor (2024).

O tanque de percolação é estruturado com perfis de ferro de 4 x 4 cm, que compõem a estrutura do reservatório. As paredes do tanque são revestidas com placas de acrílico de 1 cm de espessura. A Figura 14, apresenta as medidas em centímetros, as quais são detalhadas do tanque, incluindo dimensões como altura, largura e comprimento do tanque.

Figura 14 - Dimensões internas do tanque de percolação (cm)

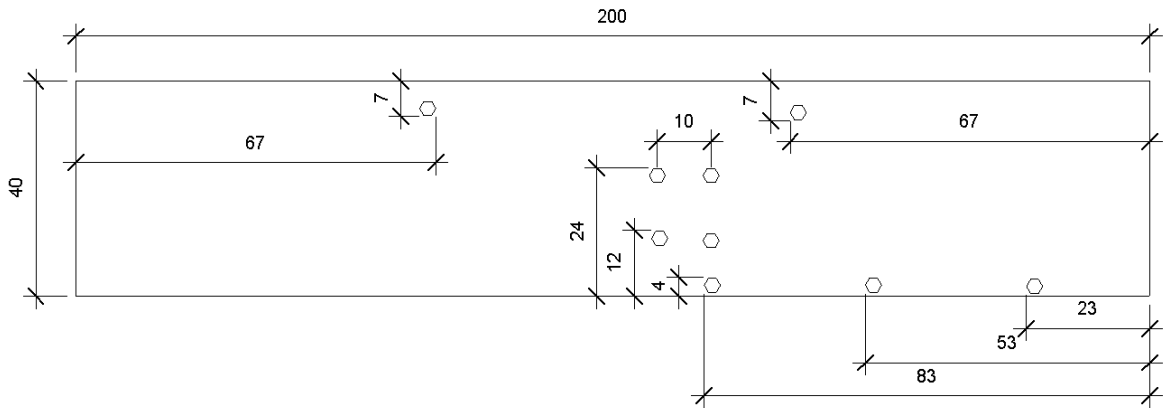


Fonte: O autor (2024).

Ademais, o projeto contempla dois dispositivos de controle de nível, compostos de PVC de 25 mm e conexões hidráulicas, estes sistemas de controle de nível também atuam como medidores de vazão. Além disso, o tanque possui sete perfurações de 1 cm de diâmetro, que foram equipadas com mangueiras para utilização como piezômetros de tubo aberto. A Figura 15, ilustra aspectos complementares do tanque apresentando as medidas em centímetros, como a

localização das perfurações para os piezômetros, dispostas no centro do tanque, e tirantes de suporte, instalados na parte central superior do tanque.

Figura 15 - Vista lateral do tanque com a localização dos piezômetros e tirantes de reforço da estrutura (cm)



Fonte: O autor (2024).

Além disso, externamente ao modelo, instalou-se um reservatório com capacidade de até 100 L, posicionada abaixo do nível do tanque para reserva d'água do ensaio. Junto ao reservatório, realizou-se a instalação de uma bomba com capacidade para elevar água a aproximadamente 200 cm de altura e potência nominal de 300 W. A bomba está conectada à parte inferior da caixa d'água por meio de um flange e possui uma tubulação inicialmente com diâmetro de 32 mm até uma altura de 50 cm em relação ao piso do laboratório. A partir dessa altura, a tubulação é reduzida para 25 mm para compatibilizar-se com as demais conexões hidráulicas do sistema.

A Figura 16, apresenta uma foto do sistema instalado no laboratório, destacando sua disposição física, os componentes descritos, bem como a integração dos piezômetros e parâmetro de medição, conexões hidráulicas, reservatório d'água, evidenciando a composição do sistema.

Figura 16 - Tanque de percolação



Fonte: O autor (2024).

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

O solo selecionado para a construção do modelo de laboratório foi a areia natural da região de Ponta Grossa, extraída do Rio Tibagi, apresentando granulometria fina e média. Para atender aos critérios de filtro de Terzaghi, foi necessária a adequação da curva granulométrica da areia média.

Este processo de adequação da areia aos critérios de filtro de Terzaghi envolve a caracterização granulométrica para garantir a retenção eficaz de partículas e drenagem adequada. A areia deve ter um tamanho de grão apropriado e um coeficiente de uniformidade adequado.

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457 (ABNT, 2024). Para a etapa E1, assim como apresentada na Figura 11 do presente trabalho, as amostras de areia foram coletadas e submetidas à secagem até alcançarem a umidade higroscópica e foram homogeneizadas. Para este fim, utilizou-se uma lona para aumentar a superfície de contato, prevenir a formação de pontos úmidos e melhorar a circulação de ar ao redor do material. A Figura 17 apresenta a disposição das amostras das areias no leito de secagem em laboratório.

Figura 17– Leito de secagem da areia em laboratório



Fonte: O autor (2024).

Para a etapa E1, também foi realizada a análise do material utilizado como filtro, que é projetado para melhorar a permeabilidade e a filtragem de partículas, de acordo com os critérios de filtro de Terzaghi. O processo incluiu a preparação da areia e a construção da granulometria adequada para os filtros. A areia foi selecionada e ajustada para alcançar uma distribuição granulométrica que permitisse a passagem de água e retenção das partículas. Durante a etapa, foram medidos o coeficiente de permeabilidade, índice de vazios e a característica física da distribuição granulométrica.

Esses parâmetros são essenciais para garantir que o material do filtro cumpra as especificações técnicas e sejam corretamente dimensionados para atender aos critérios básicos de retenção, permeabilidade e proteção da estrutura da barragem.

A figura 18 ilustra as areias distintas utilizadas nos diferentes modelos de laboratório de barragem: sendo a areia de granulometria fina foi utilizada nos aterros (Figura 18 (a)) e a areia de granulometria média foi utilizada como filtros e dreno (Figura 18 (b)).

Figura 18- Areias utilizadas na construção dos modelos de barragem; (a) Material utilizado no espaldar a jusante e a montante, (b) Material utilizado como filtro



Fonte: O autor (2024).

3.3 GEOMETRIA DO MODELO

Os modelos numéricos de fluxo adotados, tiveram como finalidade reproduzir o comportamento corresponde à seção que foi simulada experimentalmente nos modelos físicos.

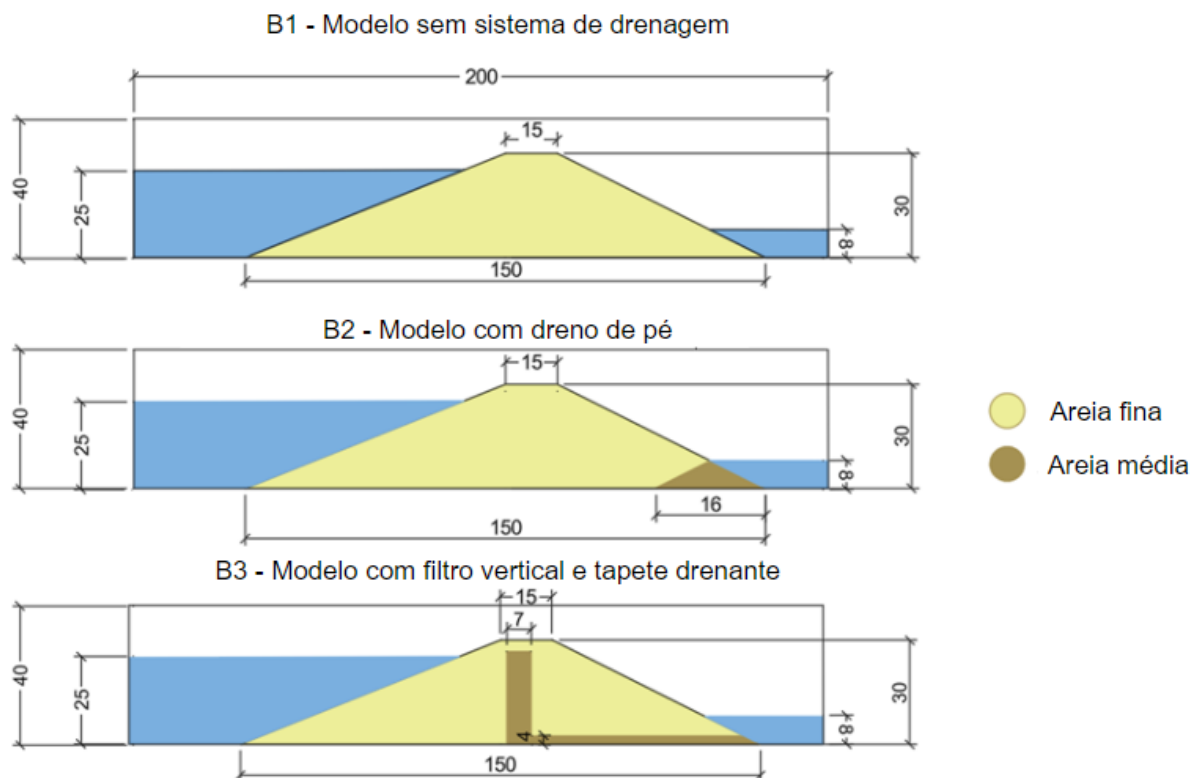
A inclinação do talude de montante, com proporção de (1V:2,5H), representa uma configuração mais suave em relação à do talude de jusante, que possui uma inclinação de (1V:2H). Essa diferença de inclinação é comum em barragens, visando a estabilidade em função das pressões hidrostáticas e das forças atuantes sobre a estrutura.

O modelo utilizado possui uma altura de 30 cm, o que permite avaliar a estabilidade e o comportamento do fluxo de água através da barragem. A largura da crista, de 15 cm, foi dimensionada para garantir a estabilidade na parte superior da barragem, influenciando também a capacidade de suportar cargas adicionais. O comprimento do modelo, de 150 cm, foi considerado suficiente para que as análises longitudinais pudessem captar o comportamento completo do fluxo e da pressão ao longo da estrutura.

Após esse dimensionamento, os componentes como filtros e drenos foram construídos com areia média, atendendo aos critérios de filtragem estabelecidos por Terzaghi. A partir da Figura 19, é possível observar as geometrias e inclinações

adotadas para os três modelos construídos, bem como as dimensões aplicadas aos filtros e drenos.

Figura 19 - Geometria do modelo de barragem para os diferentes sistemas de drenagem



Fonte: O autor (2024).

No modelo sem drenagem, de acordo com a Figura 19 (B1), seguiu-se a geometria e as inclinações estabelecidas de (1V:2,5H) à montante e (1V:2H) à jusante. Em seguida, posicionou-se na base da barragem, para a construção do modelo apresentado na Figura 19 (B2), barragem com dreno de pé, a areia de granulometria média para a construção do dreno, este foi construído com inclinação de (1V:2H), para em seguida ser realizada a deposição do material de granulometria fina, que compõe o aterro dos modelos de laboratório de barragem em camadas de até 2 cm. Para a construção do terceiro modelo, apresentado da Figura 19 (B3), barragem com filtro vertical e tapete drenante em areia, realizou-se construção inicialmente do tapete drenante de 4 cm de espessura e utilização de um filtro vertical de 7 cm de espessura, a partir da utilização da areia de granulometria média para a sua construção.

3.4 ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS NAS AREIAS

Inicialmente, os ensaios de caracterização das areias extraídas do Rio Tibagi foram conduzidos, respeitando a sequência detalhada e as normas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaios e normas dos ensaios de laboratório	
Ensaios	Normas
Umidade higroscópica	ABNT NBR 6457/2024
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/2016
Densidade real	DNER-ME 093/94
Índice de vazios mínimo	ABNT NBR 12051/2020
Índice de vazios máximo	ABNT NBR 12004/2020
Ensaio de permeabilidade	ABNT NBR 14545/2021
Ensaio de calibração do método de “chuva de areia”	Rad e Tumay (1987)

Fonte: O autor (2024).

Após a secagem ao ar das areias, iniciou-se à etapa E2, que abrange os ensaios laboratoriais. Esta fase é apresentada anteriormente neste trabalho, na Figura 11, por meio do fluxograma das etapas de desenvolvimento do processo construtivo. A primeira atividade consistiu na determinação da umidade higroscópica, utilizando o método gravimétrico, conforme especificado na ABNT NBR 6457/2024. Em seguida, foram realizados os ensaios de análise granulométrica. Inicialmente, efetuou-se o peneiramento grosso de uma amostra de 1 kg de cada tipo de areia, determinando-se a distribuição do tamanho das partículas na fração grossa.

Para a determinação da fração fina da areia, foi utilizado o método de sedimentação conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016). Nesse processo, a amostra é colocada em suspensão na água e deixada em repouso por um período predeterminado, permitindo que as partículas finas se sedimentassem por efeito da gravidade. Este método possibilita a separação das partículas de acordo com seu tamanho e densidade.

Para determinar a densidade real das partículas sólidas com diâmetro menor que 4,8 mm, foram conduzidos pelo menos dois ensaios utilizando o picnômetro de 50 ml, conforme os procedimentos estabelecidos pela DNER-ME 093/94.

O índice de vazios mínimo, que representa o estado mais compacto possível para um solo não coesivo, foi determinado conforme a norma NBR 12051 (ABNT,

2020). Este ensaio envolveu a compactação de um molde preenchido com solo seco por meio de vibrações para obter a massa específica aparente seca máxima da amostra.

O índice de vazios máximo, que indica o estado mais solto que o solo não coesivo pode alcançar, foi determinado de acordo com a NBR 12004 (ABNT, 2020). O ensaio consistiu na moldagem do solo usando um funil com altura de queda aproximada de 10 cm.

De acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2021), foi realizada a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica por meio do ensaio de permeâmetro de carga variável para as areias de granulometria fina e média modificada.

3.5 CORRELAÇÃO ENTRE DEPOSIÇÃO DO MATERIAL E PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO DAS AREIAS

O método denominado "chuva de areia" é uma técnica utilizada em laboratório para avaliar a deposição de areia, assegurando um estado padrão uniforme de compactidade e, conseqüentemente, de permeabilidade. Esse processo envolve a precipitação controlada de areia sob condições pré-estabelecidas, resultando na homogeneidade do modelo. Para a calibração de altura de queda para os modelos construídos, foram realizadas diferentes alturas de queda no cilindro metálico, a partir de uma altura inicial de 10 cm e implementando 10 cm em cada ensaio de altura de queda posterior até a altura de 60 cm.

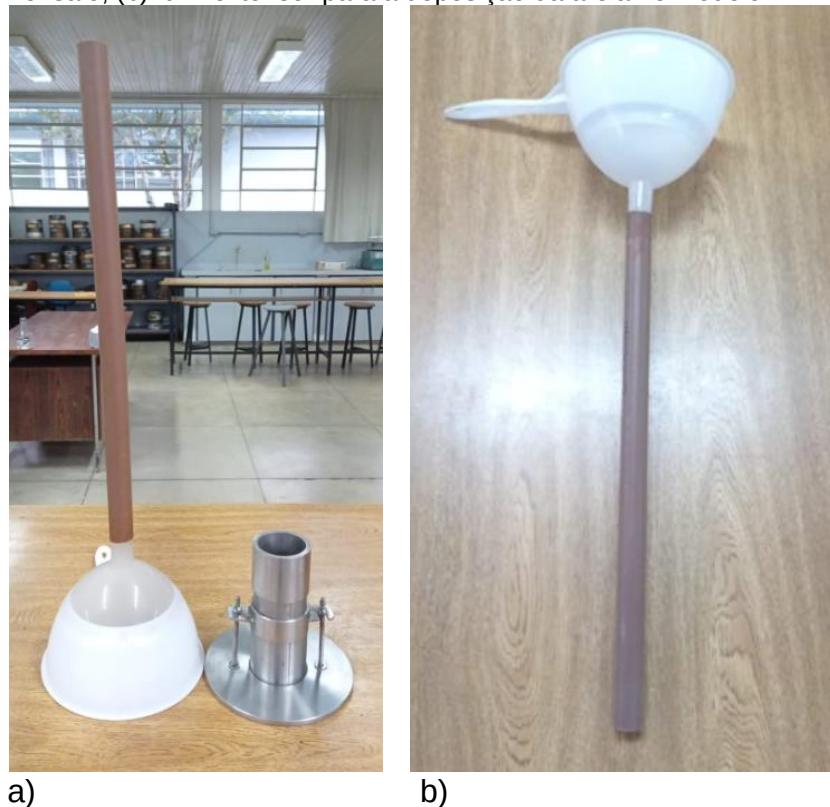
Para a calibração dos modelos de laboratório de barragens de terra desenvolvidos neste trabalho, ajustou-se a altura de queda dos grãos utilizando o método de "chuva de areia". Esse ajuste foi correlacionado com o peso específico aparente das areias. Inicialmente, determinou-se o índice de vazios mínimo e máximo das amostras e, a partir desses dados, calculou-se a compactidade relativa para os diferentes índices de vazios obtidos nas diversas alturas de queda ensaiadas.

A compactidade relativa é calculada para avaliar a densidade do solo em relação às suas condições extremas de compactação. Este cálculo é fundamental para garantir a homogeneidade do modelo, assegurando que as amostras estejam em condições representativas para as análises e avaliações realizadas.

Os ensaios foram conduzidos utilizando um cilindro de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, juntamente com um funil de abertura de 25mm e extensor em PVC para a calibração da altura e deposição do material. Dessa forma, foi possível obter uma

padronização de compactação e deposição do material durante a construção dos modelos. A Figura 20 ilustra a disposição do funil de deposição, utilizados para o ensaio de determinação do peso específico aparente seco das areias, bem como também, para a construção dos modelos.

Figura 20– Ensaio de determinação do peso específico aparente seco; (a) materiais utilizados no ensaio; (b) funil extensor para a deposição da areia no modelo



Fonte: O autor (2024).

3.6 INSTRUMENTAÇÃO DE MODELO DE LABORATÓRIO DE BARRAGEM

3.6.1 Piezômetros

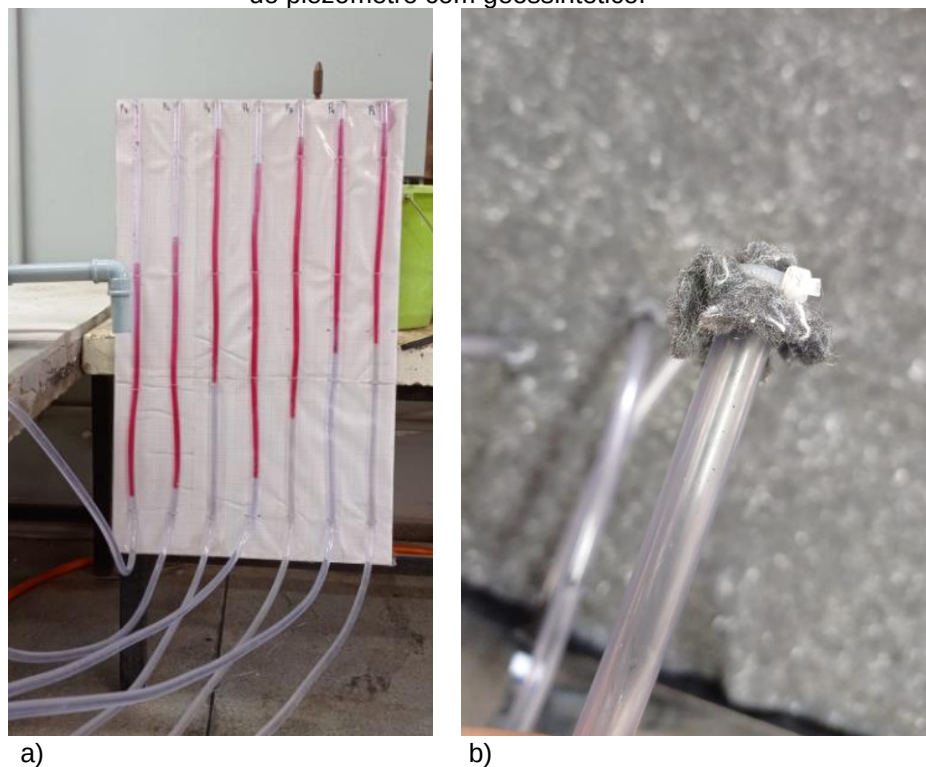
Para evitar a formação de bolhas de ar nos piezômetros, as mangueiras são preenchidas, pela extremidade superior, que está junto ao MDF, com água por meio de uma seringa.

Os piezômetros são compostos por sete mangueiras flexíveis transparentes, cada uma com diâmetro externo de 10 mm e diâmetro interno de 9 mm, e comprimento de até 150 cm. Essas mangueiras foram dispostas no painel graduado, de 70 x 50 cm fabricado em MDF. As mangueiras encontram-se adjacente ao tanque e estendem-se até a parede de acrílico, posicionando-se perpendicularmente ao eixo principal do modelo.

Ao atingir a parede de acrílico, a mangueira penetra no interior até a região central, permitindo o monitoramento da pressão hidrostática de cada um dos sete pontos disponíveis. A partir da adequação das mangueiras no interior do tanque de percolação, foi realizada a instalação de um geotêxtil não tecido nas extremidades em contato com a areia para evitar colmatção das mangueiras.

A Figura 21 apresenta a disposição dos piezômetros estendendo-se ao painel graduado, bem como o arranjo dos filtros de geossintético nas extremidades das mangueiras.

Figura 21– Piezômetro manual; (a) Painel de medição dos piezômetros da barragem; (b) Extremidade do piezômetro com geossintético.



Fonte: O autor (2024).

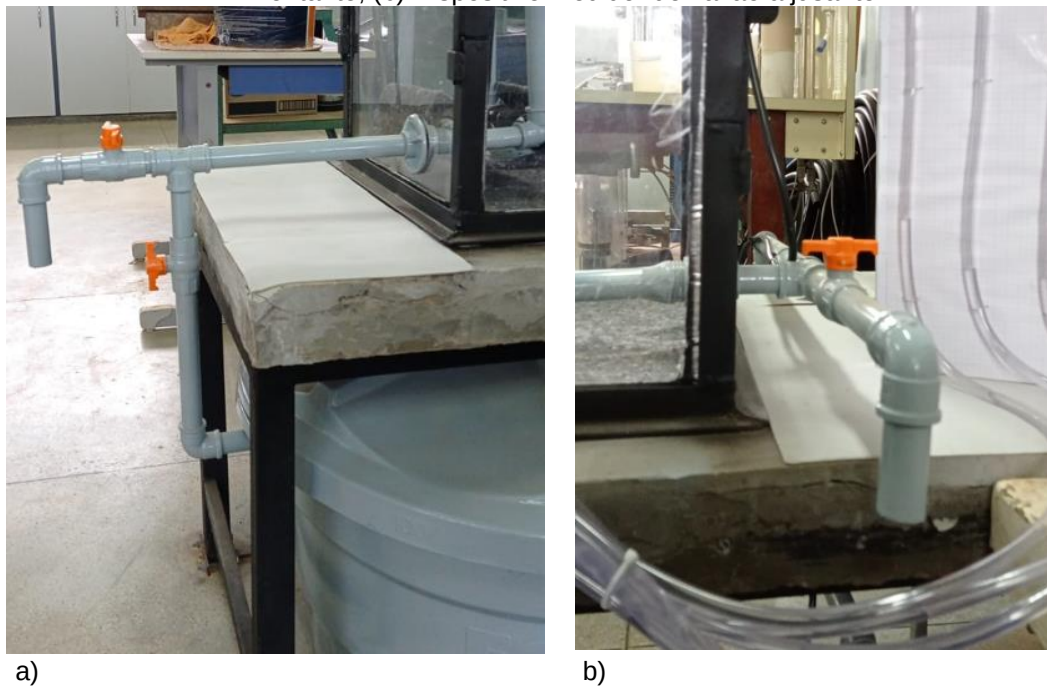
Os piezômetros são preenchidos com água por meio de uma seringa graduada de 10 ml. A seringa permanece posicionada acima da extremidade da mangueira fixada no painel, durante o processo de enchimento do tanque. A mangueira é preenchida parcialmente por água até a extremidade da parede de acrílico do tanque, após o nível d'água do tanque alcançar o nível dos piezômetros, aliado a remoção completa do ar nas tubulações, é realizado o preenchimento por completo das mangueiras. Após a estabilização do fluxo, com o enchimento do reservatório a montante, as leituras dos piezômetros foram realizadas para auscultação das poropressões no interior do modelo.

3.6.2 Dispositivos de medição de vazão

Para determinar a vazão com base no volume de água que atinge os níveis dos extravasores, estabelecidos para os reservatórios à montante e à jusante durante os ensaios, foram instalados dois dispositivos medidores de vazão. Esses dispositivos são compostos por tubos de PVC com 25 mm de diâmetro, soldados em flanges, e dois registros de globo. Os dispositivos estão localizados estrategicamente à montante e à jusante do modelo.

O conjunto de registros de globo tem como propósito restringir o retorno do fluido para o reservatório. Esse dispositivo é ilustrado na Figura 22 (a), onde o registro está instalado verticalmente para restringir a passagem de água, e na Figura 22 (b), onde o registro está instalado horizontalmente. A partir da utilização de uma proveta graduada e de um cronômetro, foi possível realizar a medição da vazão em diferentes momentos dos ensaios.

Figura 22– Disposição dos dispositivos medidores de vazão; (a) dispositivo medidor de vazão a montante, (b) Dispositivo medidor de vazão a jusante



Fonte: O autor (2024).

Ao abrir os registros globo localizados na vertical da tubulação, tanto à montante quanto à jusante, os ensaios podem ser executados em circuito fechado. Toda a água que atinge o nível dos extravasores internos é direcionada para o reservatório de aproximadamente 100L, situado abaixo do nível do tanque, e

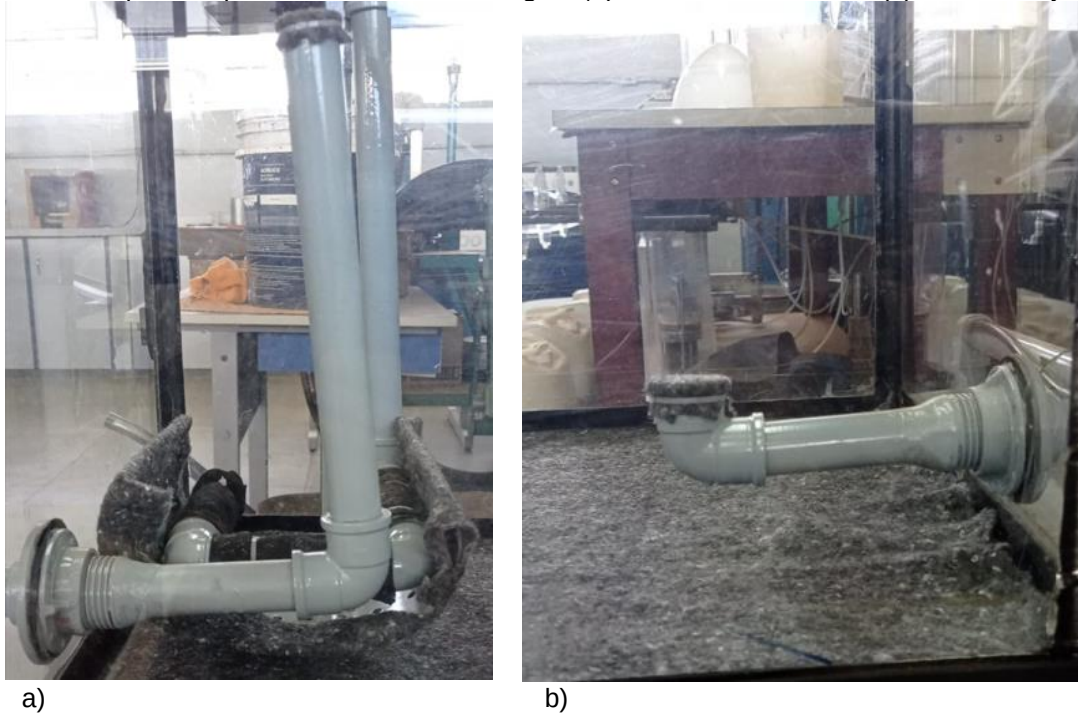
bombeada novamente para o tanque à medida que a água contida no reservatório flui pelo maciço, diminuindo o nível de água à montante.

3.6.3 Extravasores

Para o controle do nível d'água da barragem, foram instaladas tubulações verticais, tanto à montante quanto à jusante, conforme apresentado na Figura 23. Esses tubos, compostos de PVC e flanges, foram instalados nas paredes de acrílico, perpendiculares ao maior eixo do tanque.

Os instrumentos de controle de nível direcionam o excedente de água por meio de tubulações de 25 mm de diâmetro e 25 cm de altura à montante (Figura 23 (a)), e 8 cm à jusante (Figura 23 (b)), em relação à cota do fundo do tanque de acrílico. A Figura 23 ilustra o arranjo dos sistemas de extravasores à montante e à jusante do tanque.

Figura 23– Dispositivo para controle de nível d'água; (a) Vertedor à montante, (b) Vertedor à jusante



Fonte: O autor (2024).

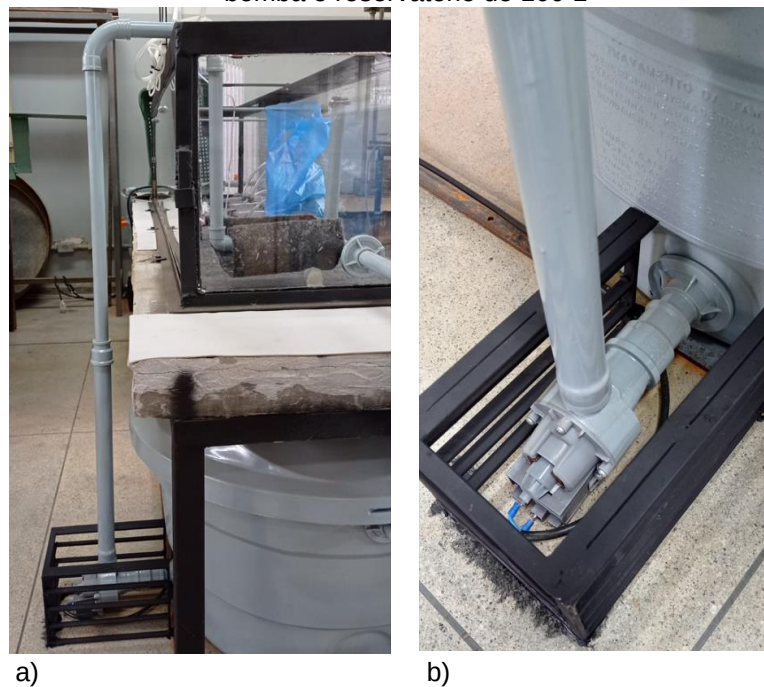
3.6.4 Sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento do modelo consistiu na instalação de uma bomba periférica, capaz de elevar a água até 200 cm, proporcionando uma vazão controlada ao tanque de percolação. A bomba periférica foi posicionada na região inferior do reservatório de 100L, localizado abaixo do tanque.

Esse dispositivo possui uma tubulação de 32 mm, que se conecta à flange e à carcaça da bomba, a fim de realizar a compatibilização das conexões hidráulicas da bomba com as demais conexões hidráulicas, adicionou-se ao sistema uma redução de 32 mm para 25 mm de diâmetro.

A Figura 24 ilustra a disposição construtiva da bomba em relação ao tanque de percolação, bem como sua conexão ao reservatório de aproximadamente 100 L.

Figura 24— Sistema de elevação de água; (a) disposição hidráulica da bomba, (b) Ligação entre a bomba e reservatório de 100 L



Fonte: O autor (2024).

3.6.5 Dissipador de energia

Os dissipadores de energia desempenham um papel crucial na mitigação dos impactos do escoamento de água em barragens, visando proteger contra danos causados pelo movimento da água.

Para este fim, foi desenvolvido um dispositivo dissipador de energia utilizando tubos perfurados de PVC de 25 mm, com a inclusão de dois joelhos de 90° e revestimento geossintético na tubulação, o que aumenta a perda de carga no ingresso da água no sistema.

Além disso, uma placa de PVC também revestida com geossintético foi inserida para reduzir a velocidade de escoamento. Ao final do sistema de dissipação, uma conexão hidráulica do tipo cap de 25 mm foi aplicada para vedar e direcionar

exclusivamente o fluxo através das perfurações sob o geossintético. A Figura 25 ilustra a disposição construtiva do sistema de descarga de vazão do modelo.

Figura 25– Dissipador para descarga da vazão de projeto



Fonte: O autor (2024).

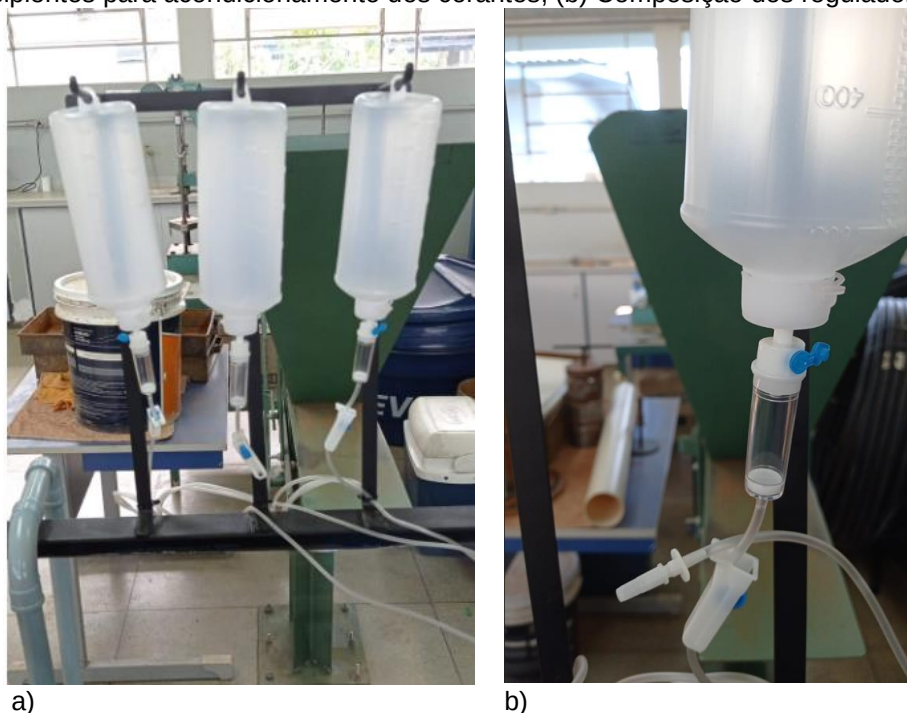
3.6.6 Traçadores de rede de fluxo

Para estudar o fluxo de água em modelos de barragens de laboratório, foram utilizados traçadores de rede de fluxo, substâncias adicionadas à água para facilitar a visualização e análise do fluxo em meios porosos.

Na construção do modelo, foi implementado um sistema para suspender três bolsas, cada uma equipada com reguladores de vazão. Estes equipamentos permitem a adição controlada de corante à barragem, possibilitando a formação de linhas de fluxo no maciço, essenciais para a investigação detalhada do escoamento.

A Figura 26 detalha a configuração do sistema de reservatório de corantes, incluindo os reguladores de vazão, essenciais para a condução precisa dos traçados da rede de fluxo.

Figura 26 – Disposição no tanque dos reservatórios dos corantes traçadores do meio granular; (a) Recipientes para acondicionamento dos corantes; (b) Composição dos reguladores de vazão;



Fonte: O autor (2024).

3.7 LEITURAS DE INSTRUMENTAÇÃO

Completada a construção dos modelos, o reservatório à montante foi preenchido e as bolhas de ar nos piezômetros foram removidas por meio de um sistema de sucção. A estabilização do fluxo foi considerada quando o volume de água adicionado ao reservatório se igualou ao volume coletado pelo sistema de drenagem.

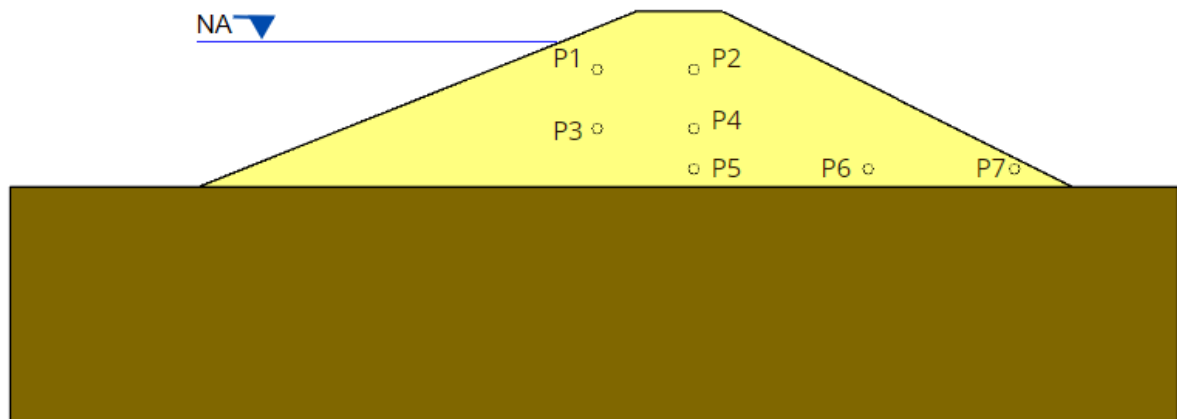
Inicialmente, foi realizada a simulação de fluxo com o modelo sem sistema de drenagem. Em seguida, construiu-se um segundo modelo, com um sistema de drenagem, composto de dreno de pé. Por fim, foi desenvolvido um terceiro modelo, que incorporou um sistema de drenagem com filtro vertical e tapete drenante. Após cada fase de construção, o fluxo foi monitorado até alcançar a estabilização, permitindo a obtenção de medições. As medições foram realizadas continuamente ao longo de todo o ensaio.

As leituras dos sete piezômetros desempenharam um papel fundamental no monitoramento das variações de poropressão ao longo dos modelos, sendo essa uma variável importante para a análise do comportamento do fluxo de água em barragens.

A Figura 27 ilustra a disposição estratégica dos piezômetros ao longo do modelo, desde a base até a superfície. Essa distribuição permite uma análise abrangente da variação de poropressão ao longo do aterro da barragem, fornecendo

informações detalhadas sobre o comportamento hidráulico em diferentes zonas do modelo.

Figura 27 – Disposição dos piezômetros ao longo do modelo



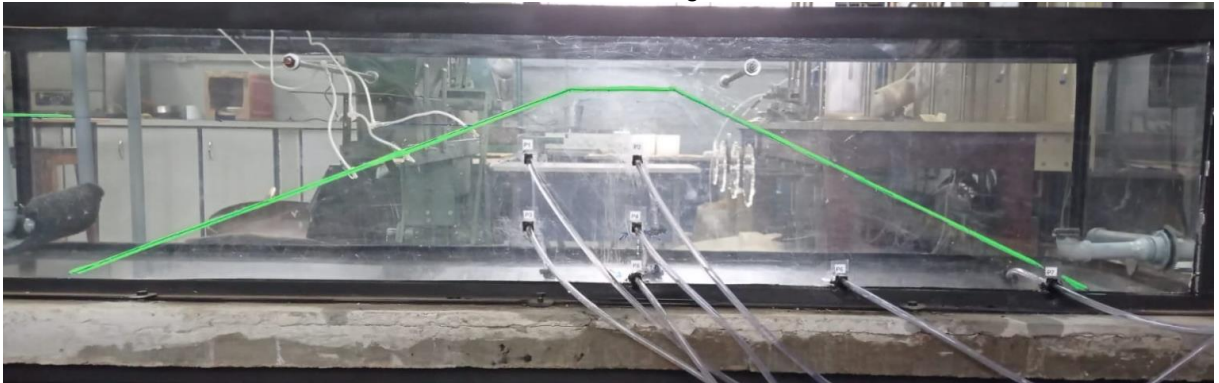
Fonte: O autor (2024).

Além disso, o monitoramento da poropressão em múltiplos pontos permite validar o modelo físico e compará-lo com as previsões do modelo numérico. O alinhamento entre o modelo físico e o numérico contribui para a compreensão detalhada do comportamento hidráulico da estrutura.

3.8 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DE LABORATÓRIO DE BARRAGEM

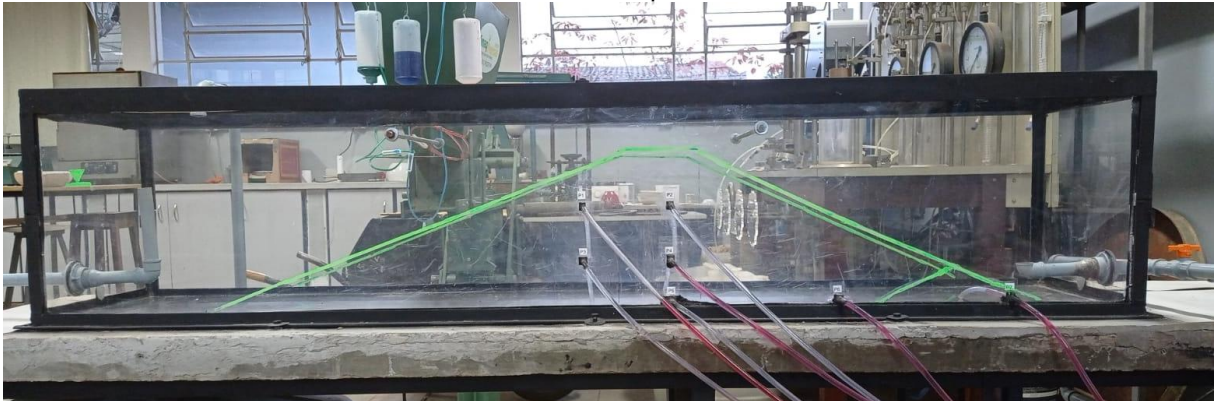
A etapa E3, abrange a construção dos diferentes modelos de laboratório variando os sistemas de drenagem. Esta fase é ilustrada na Figura 11, apresentada anterior neste trabalho, por meio do fluxograma das etapas de desenvolvimento do processo construtivo. A construção do modelo de laboratório dentro do tanque de percolação, iniciou-se por meio da elaboração do traçado com a geometria e as inclinações à montante e à jusante da barragem, delineadas na face externa do tanque, de forma a orientar a construção dos modelos sem sistema de drenagem, com dreno de pé e com filtro vertical e tapete drenante (Figura 28), (Figura 29) e (Figura 30), respectivamente.

Figura 28 - Geometria da barragem delineada na face do tanque de percolação para modelo sem sistema de drenagem



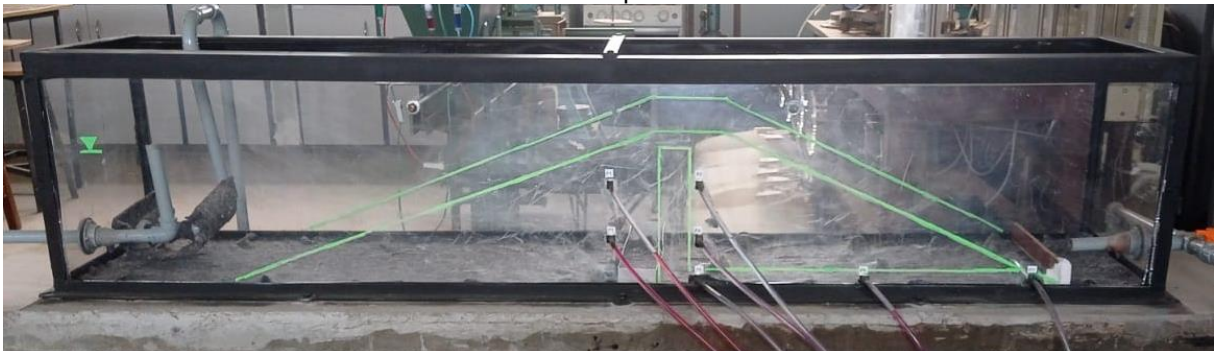
Fonte: O autor (2024).

Figura 29 - Geometria da barragem delineada na face do tanque de percolação para modelo com dreno de pé



Fonte: O autor (2024).

Figura 30 - Geometria da barragem delineada na face do tanque de percolação para modelo com filtro vertical e tapete drenante



Fonte: O autor (2024).

Após esse processo, foi depositado o material por camadas de até 2 cm no tanque, por meio da técnica conhecida como “chuva de areia”, conforme descrito no tópico 3.5 - Correlação entre deposição do material e peso específico aparente seco das areias. Foi necessária a adoção de uma altura de queda constante do material granular. A calibração foi realizada com base na determinação dos índices de vazios mínimos e máximos, de modo que a compacidade relativa obtida estivesse dentro dos

parâmetros desejados, garantindo a uniformidade da compactidade, para ambas as areias: aterro dos modelos, drenos e filtros.

Para a deposição dos materiais, foi acoplado um extensor ao funil, garantindo que a altura de queda das partículas se mantivesse constante. Além disso, foram instalados paramentos de madeira nas extremidades a montante e a jusante, delimitando a deposição do material granular e adequando a geometria idealizada ao modelo (Figura 31).

Figura 31– Construção do modelo de laboratório de barragem a partir da deposição do material granular e paramento de delimitação geométrica do modelo



Fonte: O autor (2024).

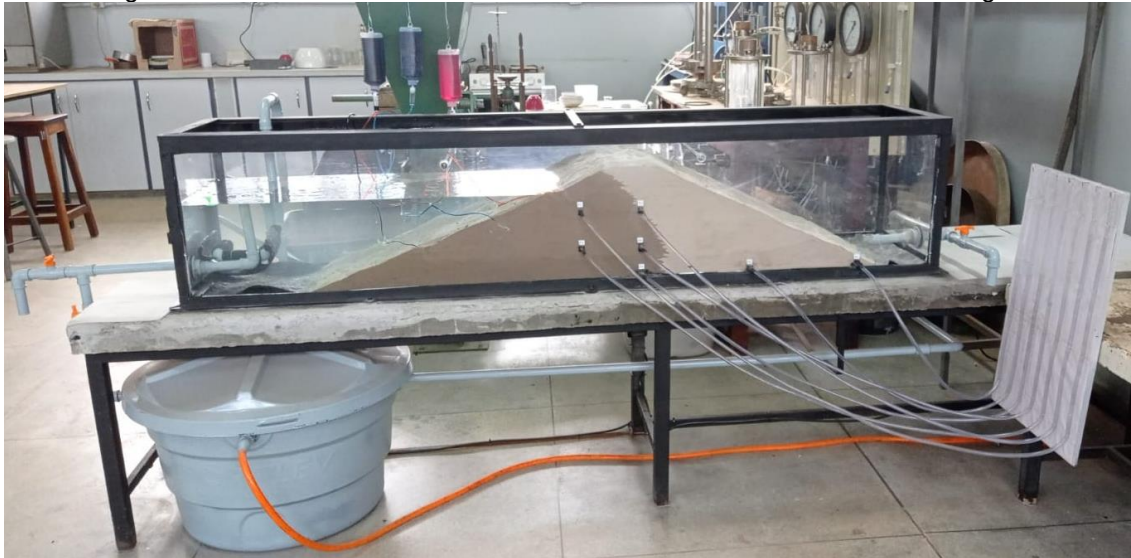
3.9 ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO E ESTABILIZAÇÃO DO FLUXO

A etapa E4, apresentada anteriormente, por meio da Figura 11 - fluxograma das etapas de desenvolvimento do processo construtivo, abordou a avaliação do comportamento hidráulico para os diferentes modelos de laboratório de barragem.

O enchimento do tanque de percolação à montante foi realizado utilizando um sistema de bombeamento que transfere o fluido do reservatório localizado abaixo do nível do tanque até o próprio tanque de percolação. Assim como apresentado, anteriormente, na Figura 16- Isométrico do projeto hidráulico do tanque - sendo a vazão d'água mantida constante e controlada para não ocasionar instabilidade no talude à montante da barragem.

Para a estabilização do fluxo, o nível d'água do reservatório à montante foi mantido constante. A Figura 32 ilustra o modelo de laboratório durante o enchimento para um modelo sem sistema de drenagem.

Figura 32 – Enchimento do reservatório à montante sem sistema de drenagem



Fonte: O autor (2024).

Semelhante ao processo de enchimento do tanque de percolação para o modelo sem sistema drenagem, foi realizada a construção de um segundo modelo de laboratório com sistema de drenagem composto por dreno de pé. Durante a estabilização do fluxo no modelo de laboratório com dreno de pé, o nível d'água do reservatório à montante foi mantido constante. Este procedimento foi essencial para garantir condições controladas e replicáveis durante os ensaios. A Figura 33 apresenta o modelo de laboratório com dreno de pé durante a fase de enchimento do reservatório.

Figura 33 - Enchimento do reservatório à montante com dreno de pé



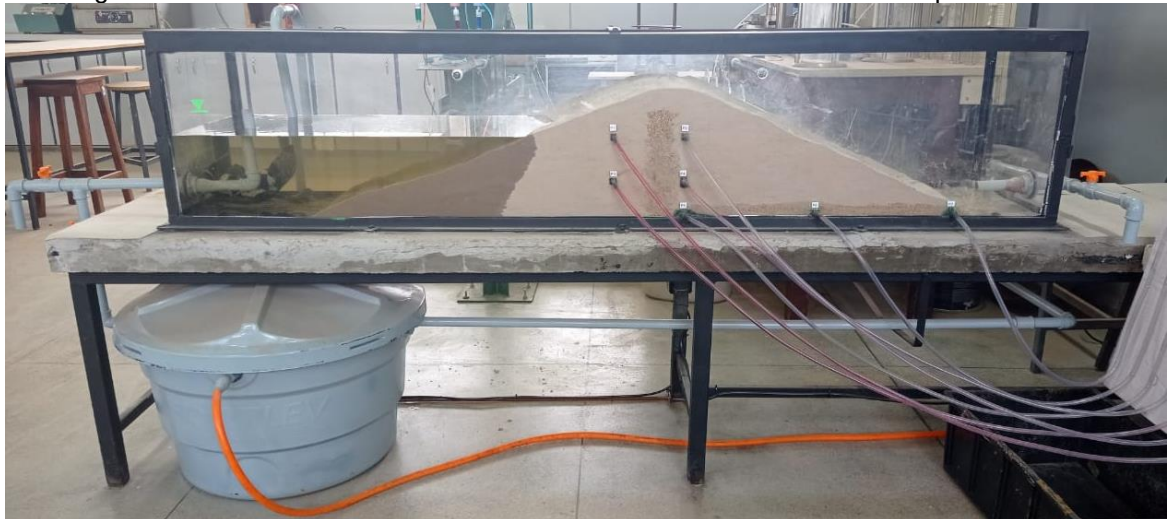
Fonte: O autor (2024).

Por fim, foi construído um terceiro modelo de laboratório, composto com sistema de drenagem com filtro vertical e tapete drenante. Este modelo foi desenvolvido para analisar a eficiência combinada do filtro vertical e um tapete

drenante, posicionado na base da barragem. A configuração visou otimizar a condução das águas de percolação, promovendo a distribuição uniforme das poropressões ao longo da estrutura, além de prevenir a instabilidade dos taludes.

A Figura 34 ilustra o modelo de laboratório com filtro vertical e tapete drenante durante o enchimento do reservatório à montante.

Figura 34 - Enchimento do reservatório à montante com filtro vertical e tapete drenante



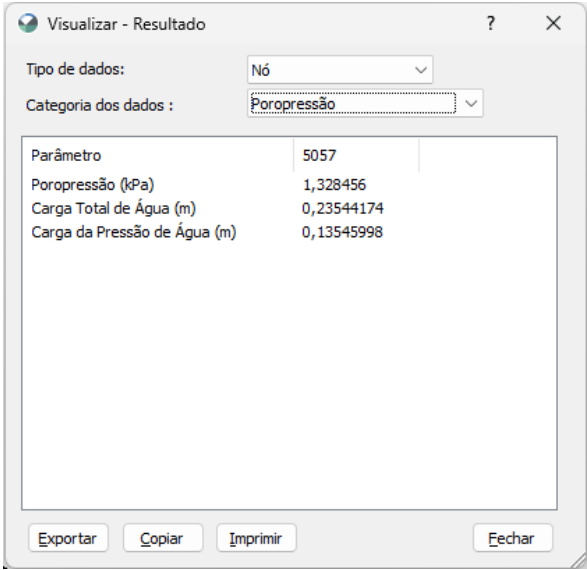
Fonte: O autor (2024).

3.10 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica seguiu a sequência construtiva detalhada no fluxograma apresentado anteriormente na Figura 11. Este fluxograma descreve a sequência construtiva para os diferentes dispositivos drenantes dos modelos. Para realizar a modelagem na etapa E5, foi utilizado o software GeoStudio, especificamente o módulo Slope e Seep integrados ao programa. Por fim, os resultados da rede de fluxo obtidos no SEEP/W foram exportados para o módulo SLOPE/W, por meio de “Análise parente”, por meio da qual foram realizadas análises da estabilidade.

Os dados numéricos foram extraídos da janela de visualização de informações de resultados do software GeoStudio, conforme ilustrado na Figura 35. As comparações foram realizadas para cada ponto de análise - piezômetro, permitindo uma avaliação detalhada das pressões de carga em cada piezômetro.

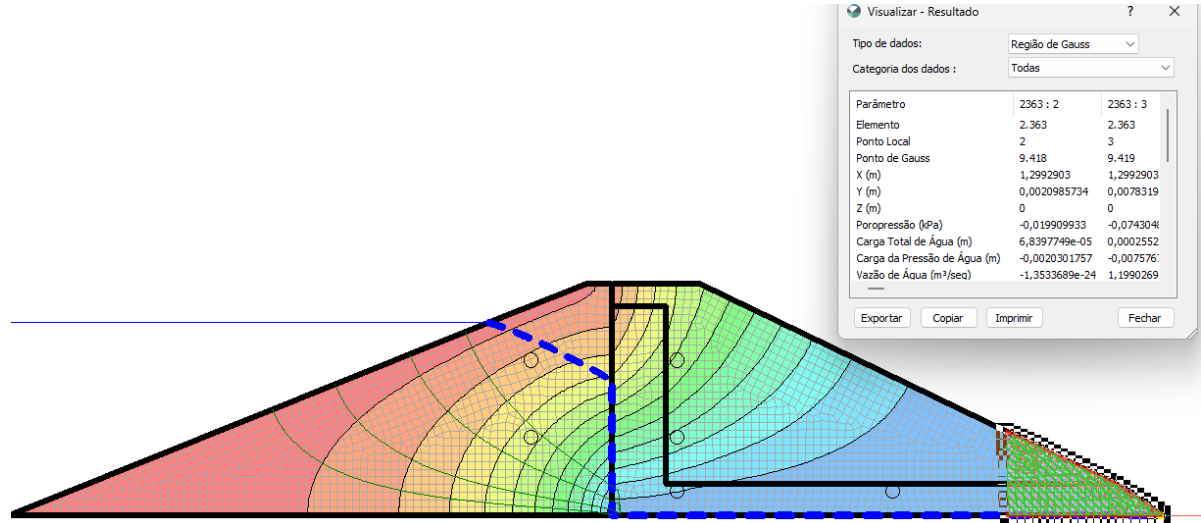
Figura 35 – Janela de visualização de informações de resultados de poropressão do software GeoStudio



Fonte: Seequent (2018).

Os dados de vazão de água foram obtidos a partir da Janela de Visualização de Informações de Resultados do software GeoStudio, utilizando o tipo de dados 'região de Gauss', conforme ilustrado na Figura 36. As regiões selecionadas para a determinação da vazão nos diferentes modelos de laboratório foram definidas a partir da base dos modelos, assegurando que todas possuíssem a mesma área de abrangência. Essa padronização na escolha das áreas possibilita uma comparação coerente entre os diferentes modelos, garantindo a consistência e a precisão das medições de vazão obtidas.

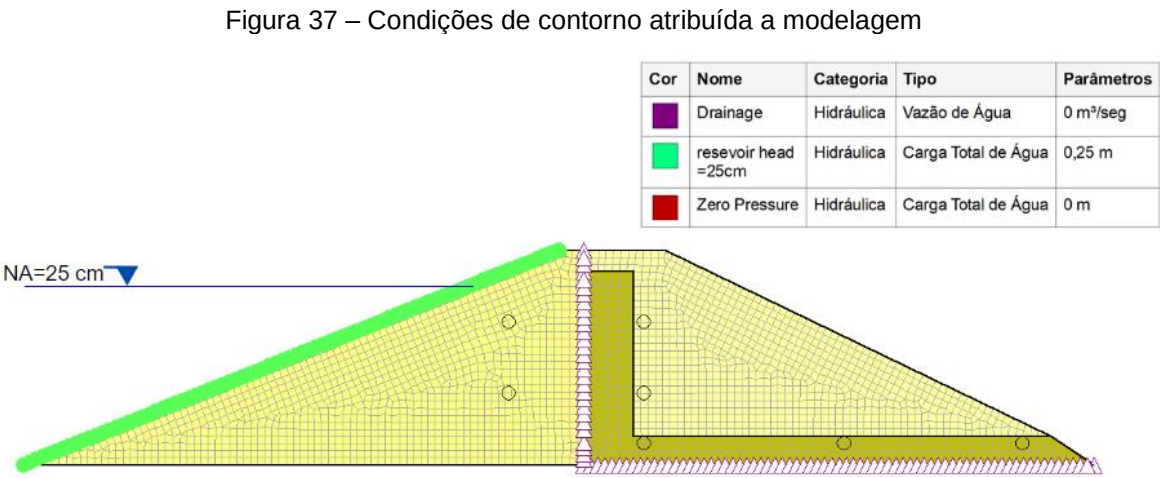
Figura 36 - Janela de visualização de informações de resultados de fluxo de água do software GeoStudio



Fonte: O autor (2024).

Para a análise da estabilidade, o modelo constitutivo adotado para o solo foi o de Mohr-Coulomb. Para a definição da superfície de pesquisa, foi selecionado o modo de grades e raios. O número armazenado de superfícies críticas foi adotado conforme padrão do módulo SLOPE/W, igual a um. Foram selecionados intervalos com número de divisões de grade igual a 50 e divisões dos raios de pesquisa igual a 50. Para as análises de estabilidade utilizando o método de Morgenstern-Price, foi definida a função lateral entre fatias de meia senoide, conforme padrão do software.

A Figura 37 ilustra o modelo de barragem utilizado na simulação, destacando as condições de contorno atribuídas à modelagem, incluindo parâmetros de carga hidráulica e áreas de drenagem. O esquema representa a distribuição das zonas de influência no modelo, com demarcações em diferentes cores para identificar as categorias e tipos de condições aplicadas. Essa configuração possibilita a visualização dos parâmetros implementados, como altura do nível do reservatório e pressão de base, conforme especificado na tabela ao lado.



Fonte: O autor (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações numéricas e dos modelos de laboratório de barragens, adotando diferentes sistemas de drenagem. Os dados incluem informações provenientes de ensaios de laboratório que possibilitaram uma caracterização detalhada dos materiais utilizados na construção dos modelos, assim como a avaliação do comportamento hidráulico desses materiais, com foco na permeabilidade e na capacidade de drenagem. Esses ensaios permitiram a simulação de condições reais em um ambiente controlado, proporcionando uma análise dos fenômenos envolvidos. Além disso, a integração entre modelagem física e ensaios laboratoriais proporcionou a calibração e validação de modelos numéricos, uma vez que a eficácia dos modelos computacionais depende da qualidade e confiabilidade dos dados experimentais.

Primeiramente, são abordadas as curvas granulométricas e a adequação da granulometria da areia média, com destaque para os critérios de filtração e drenagem aplicados aos materiais granulares. Esses critérios são essenciais para garantir o funcionamento eficiente dos sistemas de drenagem em barragens, e a análise granulométrica permite verificar a adequação dos materiais aos requisitos de projeto.

Em seguida, são discutidas as propriedades das areias utilizadas, detalhando as características granulométricas das amostras, os diâmetros efetivos dos grãos, o coeficiente de não uniformidade, bem como o ângulo de atrito dessas areias. Essas propriedades influenciam diretamente o desempenho hidráulico e estrutural dos materiais empregados nos filtros e drenos da barragem.

No que se refere aos modelos numéricos de fluxo, as variáveis dependentes foram analisadas com base nos dados experimentais. A calibração e validação dos modelos numéricos foram realizadas utilizando as simulações experimentais como base, garantindo maior precisão nos resultados computacionais. Além disso, é detalhada a geometria dos modelos de laboratório, com destaque para as dimensões e inclinações estabelecidas, que reproduzem as condições reais de uma barragem em escala reduzida.

A disposição dos materiais granulares foi avaliada a partir da determinação da altura de queda das partículas, um parâmetro fundamental nos ensaios de permeabilidade. A calibração realizada confirmou a adequação da altura de queda aos requisitos estabelecidos, e a moldagem de amostras cilíndricas de volume

conhecido permitiu testar diferentes configurações de altura de queda para garantir a homogeneidade das amostras.

Posteriormente, os resultados dos ensaios de permeabilidade são discutidos, focando nas areias usadas nos filtros e drenos da barragem. A condutividade hidráulica das amostras de areia fina e areia média modificada foi avaliada utilizando um permeâmetro de carga variável.

As poropressões registradas nos diferentes modelos físicos também foram analisadas. O processo de preenchimento dos tanques, remoção de bolhas de ar dos piezômetros e estabilização das leituras das cargas piezométricas foram conduzidos de forma rigorosa para garantir a precisão dos dados obtidos. As leituras piezométricas permitiram uma avaliação detalhada do comportamento hidráulico dos diferentes sistemas de drenagem testados.

Por fim, as simulações numéricas e laboratoriais foram conduzidas para analisar o desempenho dos diferentes sistemas de drenagem em condições controladas. As simulações numéricas forneceram uma análise teórica do comportamento dos sistemas de drenagem, enquanto os modelos físicos de laboratório corroboraram esses resultados, oferecendo uma visão prática da eficiência dos sistemas propostos. Essa combinação de abordagens teórica e experimental proporcionou uma avaliação robusta e detalhada da eficácia dos diferentes sistemas de drenagem aplicados aos modelos de barragem.

4.1 CONCEPÇÃO E ADEQUAÇÃO DAS CURVAS GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS

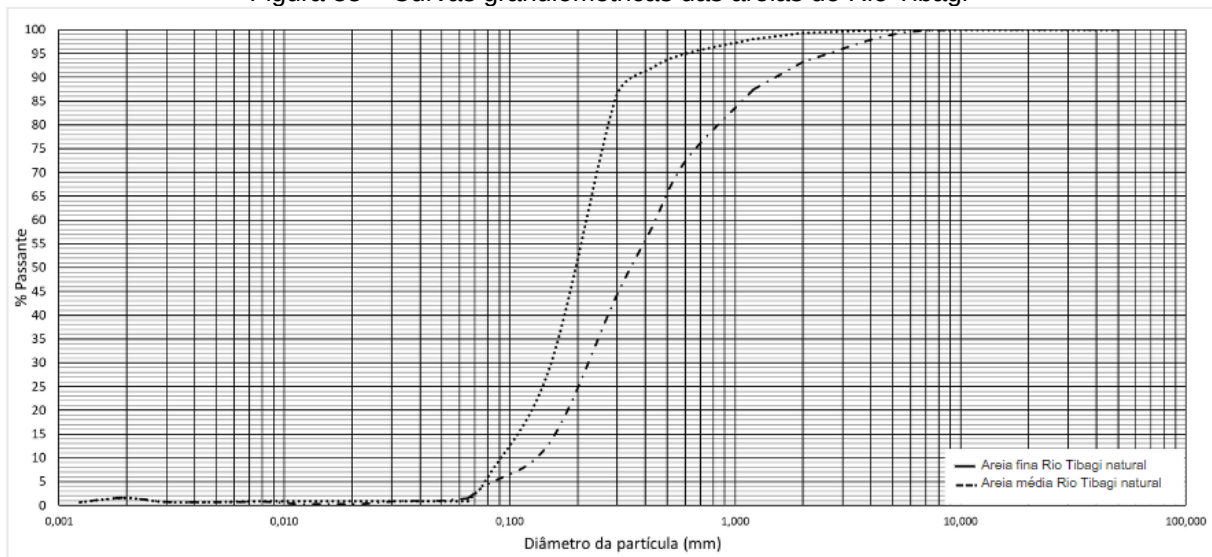
As areias utilizadas na construção dos modelos apresentam duas granulometrias distintas: uma de gradação fina, para a composição do aterro dos modelos, e outra de gradação média, utilizada para a construção dos filtros e drenos. Os materiais que compõem o aterro e os filtros dos modelos foram submetidos a ensaios de peneiramento grosso e fino, além de sedimentação.

A partir da análise das curvas granulométricas das areias naturais do Rio Tibagi, representadas na Figura 38, é possível observar que a distribuição granulométrica das amostras de areia fina e areia média difere significativamente em relação ao diâmetro das partículas. A curva granulométrica da areia fina indica que a maior parte do material está abaixo de 1 mm de diâmetro, com aproximadamente 95% das partículas menores que 0,5 mm. Essa característica sugere que a areia fina do

Rio Tibagi é composta principalmente por partículas pequenas e bem distribuídas, o que pode ser adequado para aplicações que demandam alta uniformidade na granulometria.

Por outro lado, a areia média apresenta uma maior variedade no tamanho das partículas, com um percentual significativo de partículas de diâmetro superior a 1 mm. Aproximadamente 95% das partículas da areia média são menores que 1,5 mm, o que indica uma distribuição mais ampla de tamanhos de grãos. A transição na curva granulométrica dessa areia é mais gradual, o que reflete uma maior heterogeneidade na composição das partículas.

Figura 38 – Curvas granulométricas das areias do Rio Tibagi



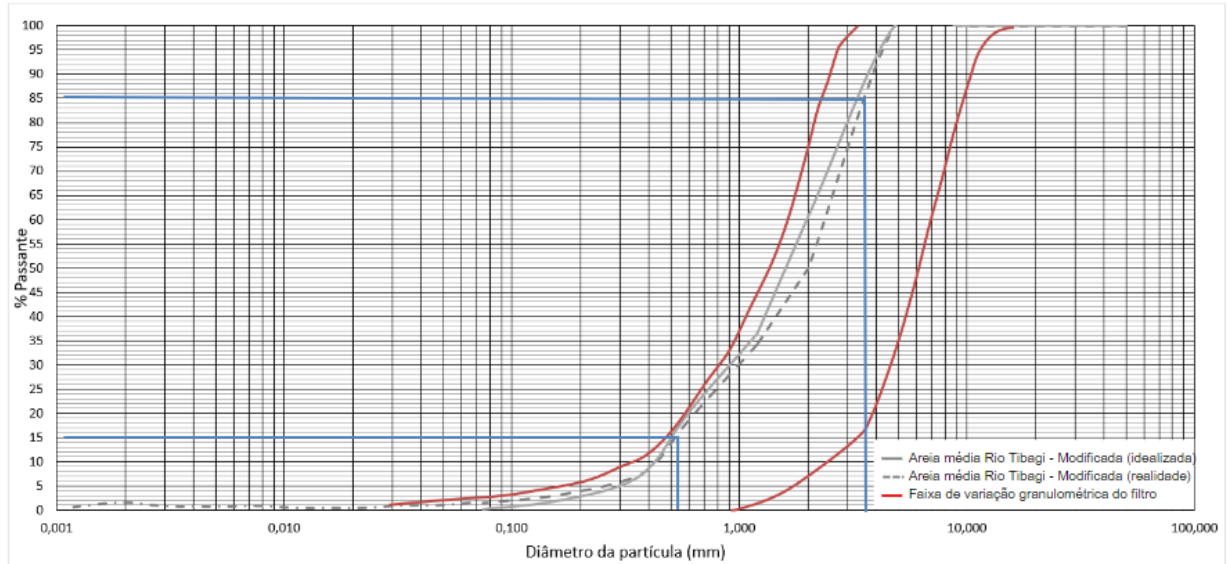
A Figura 39 ilustra as curvas granulométricas da areia média do Rio Tibagi, tanto em seu estado modificada idealizada graficamente, quanto em sua condição real após o peneiramento, além da faixa de variação granulométrica do filtro proposto por Terzaghi.

A faixa de variação granulométrica dos filtros e dreno, representada em vermelho, mostra um comportamento esperado para garantir a permeabilidade e a capacidade de drenagem, com uma distribuição de partículas que se adequa às funções de filtragem propostas por Terzaghi, permitindo o fluxo de água, mas retendo as partículas do material do corpo da barragem.

O material empregado na construção do filtro vertical, tapete drenante e dreno de pé contém cerca de 13% de partículas com diâmetro entre 0,2 mm e 0,6 mm, 32% entre 0,6 mm e 2 mm, e aproximadamente 44% entre 2 mm e 4,8 mm. Esses valores

são adequados para o bom funcionamento dos sistemas de filtração e drenagem, conforme descrito por Terzaghi e Peck (1967), que salientam a importância de uma granulometria que permita a passagem livre da água, evitando a colmatção e mantendo a integridade do filtro ao longo do tempo.

Figura 39 - Curvas de distribuição granulométricas para a areia dos filtros e dreno



Fonte: O autor (2024).

4.2 PROPRIEDADES DAS AREIAS UTILIZADAS

A Tabela 2 apresenta as propriedades das areias fina e modificada utilizadas neste trabalho, fornecendo os dados para a análise do comportamento geotécnico desses materiais. O peso específico das partículas sólidas (γ_s) é uma característica fundamental que reflete a composição mineralógica dos solos em estudo. No presente trabalho, a areia fina apresentou uma densidade de grãos de 2,642 g/cm³, enquanto a areia modificada apresentou uma densidade ligeiramente maior, de 2,644 g/cm³. Esses valores são típicos para solos arenosos, como descrito por Holtz, Kovacs e Sheahan (2011), e indicam uma composição mineral semelhante entre as duas amostras.

Os índices de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$) são parâmetros críticos que influenciam diretamente a capacidade de compactação e a densidade do solo. A areia fina apresentou um índice de vazios máximo de 0,82 e um índice mínimo de 0,59. Em contraste, a areia modificada apresentou índices de vazios significativamente menores, com índice de vazios máximo de 0,67 e índice de vazios mínimo de 0,43.

Além disso, o coeficiente de não uniformidade (CNU) e o coeficiente de curvatura (CC) fornecem uma visão adicional sobre a distribuição granulométrica das areias. A areia fina apresentou um CNU de 2,44 e um CC de 1,29, indicando uma distribuição granulométrica relativamente uniforme e bem graduada. Em contraste, a areia modificada apresentou um CNU de 3,10 e um CC de 2,03, sugerindo uma distribuição de tamanhos de grãos mais heterogênea, o que favorece uma melhor intertravagem das partículas e, conseqüentemente, uma maior resistência mecânica, como enfatizado por Terzaghi, Peck e Mesri (1996).

Tabela 2 - Propriedades das areias utilizadas

	Areia fina	Areia modificada
γ_s (g/cm ³)	2,642	2,644
$e_{m\acute{a}x}$	0,82	0,67
$e_{m\acute{i}n}$	0,59	0,43
Φ (°)	32	36
D ₁₀	0,09	0,40
D ₁₅	0,12	0,51
D ₃₀	0,16	1,00
D ₆₀	0,22	1,23
D ₈₅	0,30	1,35
CNU	2,44	3,10
CC	1,29	2,03

Fonte: O autor (2024).

4.3 ALTURAS PARA A DEPOSIÇÃO DAS AREIAS A PARTIR MÉTODO DE CHUVA DE AREIA

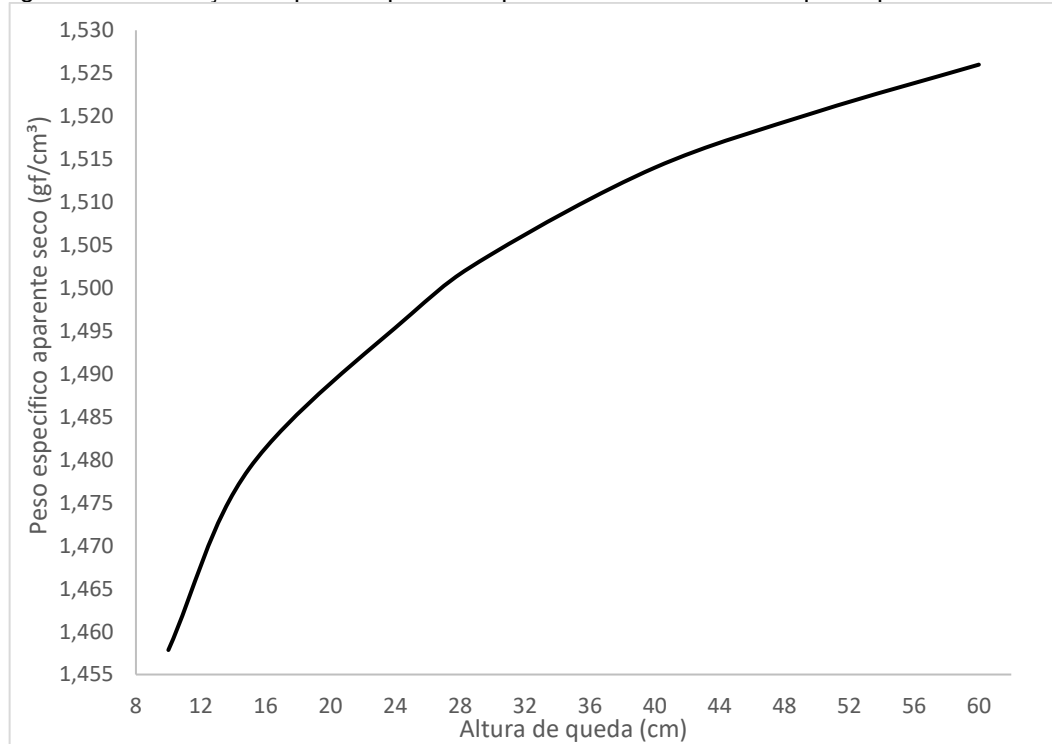
Neste trabalho, dado que o fluxo pela barragem é predominantemente influenciado pelas areias, foram determinadas as compacidades desses materiais. Conforme detalhado anteriormente, os índices de vazios foram obtidos para fornecer informações sobre a deposição das areias pelo método da “chuva de areia”.

Os ensaios apresentaram índice de vazios máximo para a areia fina de 0,82, enquanto índice de vazios mínimo de 0,67. Em contraste, a areia de granulometria média modificada apresentou um índice de vazios máximo de 0,59 e um índice de vazios mínimo de 0,43.

A partir desses resultados, foi possível ajustar a altura da chuva de areia para determinar o peso específico aparente seco de cada tipo de areia. O processo de

calibração incluiu a moldagem de três amostras para cada altura de queda. Os valores obtidos para o peso específico aparente seco das amostras de areia fina, em função das diferentes alturas de queda, estão apresentados na Figura 40.

Figura 40 - Avaliação do peso específico aparente seco x altura de queda para a areia fina



Fonte: O autor (2024).

Após determinar os índices de vazios máximo e mínimo, verificou-se a compacidade relativa alcançada com a altura de queda definida para a deposição da areia de granulometria fina. Com a altura de queda fixada em 50 cm para a areia fina, o ensaio revelou que para a altura de queda adotada proporcionou-se uma compacidade relativa de aproximadamente 34%, resultando em um peso específico aparente seco (γ_d) de 1,524 g/cm³ e um índice de vazios de 0,73 para a areia fina. De acordo com Matos e Fernandes (2011), a compacidade relativa é uma métrica fundamental para classificar a densidade de solos granulares. Solos com compacidade relativa acima de 70% são geralmente classificados como "densos", enquanto aqueles com CR abaixo de 30% são considerados "soltos". Com base nessa classificação, a compacidade de 34% alcançada nesse ensaio coloca a areia fina na categoria de "medianamente compacta". A Tabela 3 mostra relação entre altura de queda dos grãos, índice de vazios e compacidade relativa para a areia de granulometria fina.

Tabela 3 – Relação entre altura de queda, Índice de vazios (e) e compactidade relativa (CR) para a areia fina

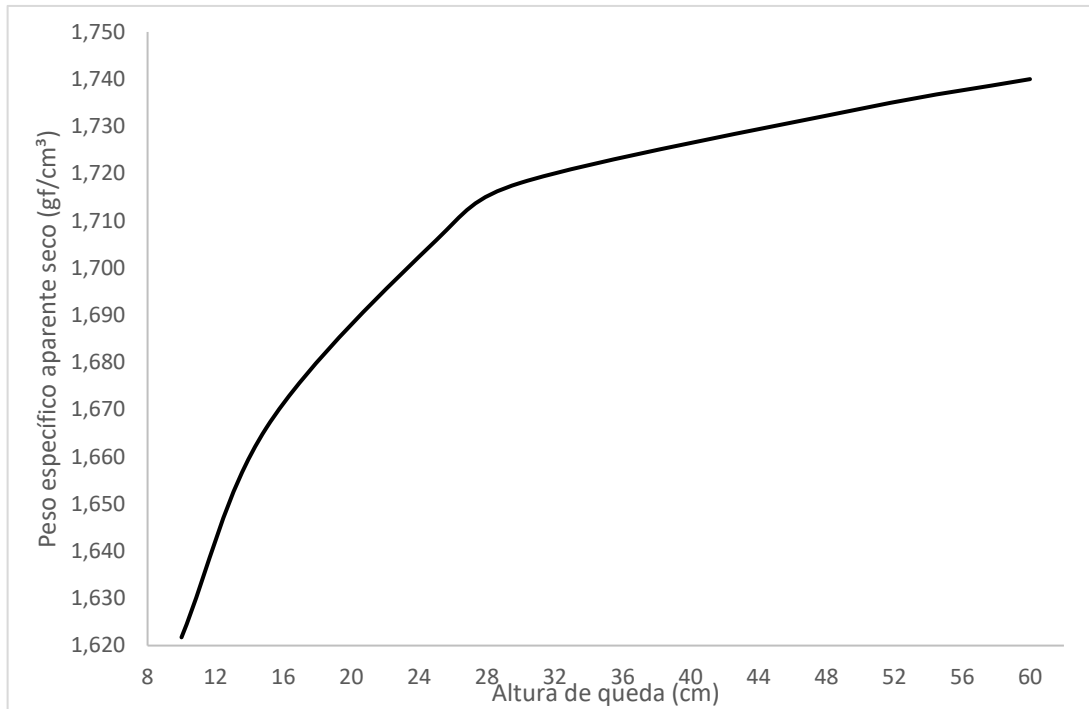
Altura (cm)	e	CR (%)
10	0,81	4
15	0,79	15
25	0,77	18
30	0,76	21
40	0,75	25
50	0,73	34
60	0,71	37

Fonte: O autor (2024).

A Figura 41 ilustra o ensaio de calibração realizado para a areia de granulometria média modificada para os critérios de filtro de Terzaghi, onde são apresentados os valores de peso específico aparente seco (γ_d) em função das diferentes alturas de queda.

Conforme observado no gráfico, para alturas de queda menores, entre 8 cm e 16 cm, o aumento no peso específico aparente seco é significativo, passando de aproximadamente $1,625 \text{ g/cm}^3$ para $1,675 \text{ g/cm}^3$. Isso indica que, nessas alturas, o grau de compactação da areia é altamente sensível à variação da altura de deposição. A partir de 20 cm, nota-se uma estabilização mais gradual no incremento do peso específico, atingindo valores próximos a $1,740 \text{ g/cm}^3$ para uma altura de queda de 60 cm. Este comportamento indica que, em alturas maiores, o aumento no grau de compactação se torna menos expressivo.

Figura 41 - Avaliação do peso específico aparente seco x altura de queda para a areia média modificada



Fonte: O autor (2024).

De maneira similar aos ensaios realizados com a areia de granulometria fina, nos ensaios com a areia de granulometria média modificada, utilizada na construção dos filtros e drenos dos modelos, a altura de queda de 50 cm aplicada resultou em uma compactação relativa de aproximadamente 51%. Isso indica que a areia atingiu um estado de maior densidade em comparação à areia fina.

A partir da altura de queda de 50 cm encontrou-se um peso específico aparente seco (γ_d) de 1,734 g/cm³ e um índice de vazios de 0,53. A Tabela 4 apresenta o índice de vazios em função da altura de queda dos grãos para a areia de granulometria média modificada.

Tabela 4 - Relação entre altura de queda, Índice de vazios (e) e compacidade relativa (CR) para a areia média modificada

Altura (cm)	e	CR (%)
10	0,63	17
12	0,61	26
15	0,59	35
25	0,55	41
30	0,54	46
50	0,53	51
60	0,51	54

Fonte: O autor (2024).

4.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DAS AREIAS

O ensaio teve como objetivo definir o valor do coeficiente de permeabilidade dos materiais que comporiam o aterro da barragem os filtros e drenos. A determinação deste parâmetro consistiu na realização do ensaio com permeâmetro de carga variável para as areias de granulometria fina e média modificada para os critérios de filtro de Terzaghi. A escolha da altura de queda de deposição controlada dos grãos, permite que a areias alcancem uma densidade aparente adequada, o que impacta diretamente a condutividade hidráulica.

A Tabela 5 apresenta os dados experimentais referentes ao coeficiente de condutividade hidráulica (k) da areia fina. Os resultados do ensaio realizados em cinco diferentes pontos (P1 a P5) no ensaio de condutividade hidráulica indicam uma variação leve. Os valores ajustados para a temperatura de 25 °C (K_{25}) variaram de $6,41 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$ a $7,78 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$, com uma média de $7,01 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$. Essa faixa de valores sugere que a areia fina estudada possui uma permeabilidade moderada, característica de solos arenosos bem classificados. Para solos arenosos, a permeabilidade é influenciada principalmente pela distribuição granulométrica, compacidade, e saturação, conforme apontado por Gupta e Gupta (2020).

Tabela 5 – Coeficiente de condutividade hidráulica da areia fina

	P1	P2	P3	P4	P5
a (cm ²)	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91
L (cm)	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
A(cm ²)	176,71	176,71	176,71	176,71	176,71
t (s)	1,00	3,00	4,00	5,00	6,00
hi (cm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
hf (cm)	78,50	76,50	75,30	74,00	72,00
k (cm/s)	$8,41 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$7,37 \cdot 10^{-5}$	$7,66 \cdot 10^{-5}$	$8,74 \cdot 10^{-5}$
T (°C)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
K25 (cm/s)	$7,49 \cdot 10^{-5}$	$6,41 \cdot 10^{-5}$	$6,56 \cdot 10^{-5}$	$6,82 \cdot 10^{-5}$	$7,78 \cdot 10^{-5}$
K25 méd (cm/s)	$7,01 \cdot 10^{-5}$				

Fonte: O autor (2024).

A Tabela 6 reúne os resultados experimentais relacionados ao coeficiente de condutividade hidráulica (k) da areia modificada, obtidos em cinco pontos distintos (P1 a P5). Os valores ajustados à temperatura de 25 °C (K25) mostraram variação entre $1,22 \cdot 10^{-4}$ cm/s e $1,50 \cdot 10^{-4}$ cm/s, com uma média de $1,35 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

Tabela 6 – Coeficiente de condutividade hidráulica da areia modificada

	P1	P2	P3	P4	P5
a (cm ²)	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91
L (cm)	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
A(cm ²)	176,71	176,71	176,71	176,71	176,71
t (s)	1,00	3,00	4,00	5,00	6,00
hi (cm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
hf (cm)	77,40	75,50	73,40	70,30	68,00
k (cm/s)	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$
T (°C)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
K25 (cm/s)	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$
K25 méd (cm/s)	$1,35 \cdot 10^{-4}$				

Fonte: O autor (2024).

4.4.1 Resultados de carga de pressão para os modelos de laboratório com diferentes sistemas de drenagem

A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios realizados nos diferentes modelos de laboratório de barragens de terra, que variam conforme a presença e o tipo de sistema de drenagem utilizado: sem sistema de drenagem, com dreno de pé e com filtro vertical e tapete drenante. Os dados foram obtidos a partir das leituras dos piezômetros posicionados em diferentes pontos dos modelos, permitindo a análise das cargas de pressão e das vazões de cada configuração.

Tabela 7 - Resultados obtidos nos ensaios para os diferentes modelos físicos construídos

Carga de pressão (cm)					
Piezômetro	Coordenadas		Sem sistema de drenagem	Dreno de pé	Filtro vertical e tapete drenante
	X (cm)	Y (cm)			
P1	99,00	20,50	2,10	1,90	1,20
P2	83,00	20,50	2,40	2,10	0,40
P3	99,00	10,50	19,00	15,30	5,70
P4	83,00	10,50	19,30	15,20	0,70
P5	83,00	3,00	27,60	26,30	1,10
P6	53,00	3,00	8,60	5,50	0,90
P7	23,00	3,00	4,80	2,90	0,50
Vazão (L/min)			96,36	102,66	58,93

Fonte: O autor (2024).

Os resultados obtidos para a configuração sem sistema de drenagem estão apresentados, as pressões de carga foram determinadas a partir das leituras de carga piezométrica em diferentes pontos do modelo físico. Esses dados fornecem uma base comparativa para a análise do comportamento da estrutura em condições de fluxo constante, sem a interferência de mecanismos de drenagem, permitindo uma avaliação mais clara dos parâmetros hidráulicos envolvidos. Após o estabelecimento do regime de fluxo laminar, foram realizadas três medições de vazão, resultando em uma média de 96,36 L/min.

Os piezômetros P1 e P2, localizados na cota mais alta de $Y = 20,5$ cm, registram cargas de pressão de 2,1 cm e 2,4 cm, respectivamente. A proximidade dos valores sugere uma distribuição de pressão relativamente uniforme ao longo dessa linha horizontal. Descendo para uma cota intermediária, P3 e P4, ambos a $Y = 10,5$

cm, mostram um aumento significativo na pressão, com valores de 19 cm e 19,3 cm, respectivamente. Esse incremento na pressão à medida que se desce no perfil é ainda mais evidente no piezômetro P5, situado na cota mais baixa de $Y = 3$ cm no centro do modelo $X = 83$ cm, onde a carga de pressão alcança 27,6 cm.

Essa tendência de aumento da carga de pressão com a profundidade é importante para entender o comportamento do fluxo de água subterrâneo e as forças exercidas no solo, especialmente em áreas sem drenagem adequada. A posição e a leitura dos piezômetros P6 e P7, ambos também na cota de $Y = 3$ cm, mas em posições horizontais mais distantes $X = 53$ cm e $X = 23$ cm, com cargas de pressão substancialmente menores de 8,6 cm e 4,8 cm, respectivamente, indicam que a pressão hidrostática diminui significativamente com o afastamento do centro do modelo.

Os resultados obtidos para o modelo com dreno de pé evidenciam uma redução significativa nas cargas de pressão em comparação com o modelo sem sistema de drenagem. As leituras de pressão de carga foram coletadas nas mesmas posições dos piezômetros, permitindo uma análise comparativa do comportamento da estrutura em condições de fluxo constante, mas agora com a influência de um mecanismo de drenagem. Após o estabelecimento do regime de fluxo laminar, as medições de vazão indicaram um valor médio de 102,66 L/min, ligeiramente superior ao modelo sem drenagem, o que aponta para uma melhora na drenagem e redução da pressão interna.

Nos piezômetros P1 e P2, localizados na cota mais alta $Y = 20,5$ cm, as cargas de pressão registradas foram de 1,9 cm e 2,1 cm, respectivamente, uma ligeira redução em relação aos valores obtidos no modelo sem drenagem. Essa diminuição demonstra que o dreno de pé começou a dissipar a pressão logo nas camadas superiores do solo. Para os piezômetros P3 e P4, posicionados na cota intermediária $Y = 10,5$ cm, as cargas de pressão caíram para 15,3 cm e 15,2 cm, representando uma redução notável em relação aos 19 cm observados no modelo sem drenagem. Isso confirma que o sistema de drenagem com dreno de pé foi eficaz em reduzir a pressão hidrostática nas camadas intermediárias.

A leitura do piezômetro P5, localizado no centro do modelo $X = 83$ cm e na cota mais baixa $Y = 3$ cm, mostrou uma carga de pressão de 26,3 cm. Embora ainda seja um valor elevado, ele apresenta uma redução em relação aos 27,6 cm observados no modelo sem drenagem. Isso indica que o dreno de pé conseguiu aliviar

parte da pressão no fundo do modelo, mas ainda não foi capaz de proporcionar uma drenagem tão eficiente quanto os sistemas mais avançados, como o filtro vertical e o tapete drenante.

Os piezômetros P6 e P7, localizados nas cotas mais baixas $Y = 3$ cm, mas afastados horizontalmente do centro $X = 53$ cm e $X = 23$ cm, registraram cargas de pressão de 8,5 cm e 2,9 cm, respectivamente. Esses valores mostram uma diminuição acentuada na pressão à medida que se afasta do centro do modelo, uma tendência semelhante à observada no modelo sem drenagem, mas com valores absolutos menores. Essa redução contínua nas pressões mais distantes do centro evidencia a função do dreno de pé em redistribuir e aliviar a pressão hidrostática ao longo da estrutura.

Já os resultados obtidos para o modelo com filtro vertical e tapete drenante demonstram uma eficácia superior em comparação com os outros sistemas de drenagem testados. Com este sistema, a vazão registrada foi de 58,93 L/min, a menor entre todos os modelos, o que sugere que o filtro vertical e o tapete drenante não proporcionaram um controle mais eficiente do fluxo de água. Isso reflete ausência da capacidade aprimorada de dissipação de água.

Nos piezômetros P1 e P2, localizados na cota mais alta $Y = 20,5$ cm, as cargas de pressão registradas foram de 1,2 cm e 0,4 cm, respectivamente, valores muito inferiores aos observados nos modelos sem drenagem e com dreno de pé. Esse resultado já demonstra a alta eficiência do filtro vertical e do tapete drenante na dissipação da água acumulada nas camadas superiores. Nas cotas intermediárias, P3 e P4 $Y = 10,5$ cm, as cargas de pressão caíram drasticamente para 5,7 cm e 0,7 cm, valores que indicam uma redução mais expressiva da pressão, confirmando a superioridade deste sistema em comparação com o dreno de pé.

No piezômetro P5, situado no centro $X = 83$ cm e na cota mais baixa $Y = 3$ cm, a carga de pressão caiu para 1,1 cm, uma redução considerável em comparação aos 26,3 cm do modelo com dreno de pé. O comportamento dos piezômetros P6 e P7, localizados nas cotas mais baixas $Y = 3$ cm, também reflete essa eficiência, com leituras de 5 cm e 0,5 cm, respectivamente, indicando que a pressão foi praticamente eliminada nas áreas mais afastadas do centro.

Os resultados apresentados na Tabela 8 refletem as cargas de pressão obtidas por meio de modelagens numéricas para três diferentes configurações de

drenagem: sem sistema de drenagem, com dreno de pé e com filtro vertical e tapete drenante.

Tabela 8 - Resultados obtidos nos ensaios para as diferentes modelagens numéricas

Carga de pressão (cm)					
Piezômetro	Coordenadas		Sem sistema de drenagem	Dreno de pé	Filtro vertical e tapete drenante
	X (cm)	Y (cm)			
P1	99,00	20,50	2,41	2,55	1,38
P2	83,00	20,50	2,69	2,96	6,17
P3	99,00	10,50	18,36	13,77	0,01
P4	83,00	10,50	18,00	13,79	0,80
P5	83,00	3,00	26,33	25,00	0,77
P6	53,00	3,00	8,20	5,12	0,66
P7	23,00	3,00	3,99	2,02	0,55
Vazão (L/min)			262,36	74,59	40,88

Fonte: O autor (2024).

No modelo sem sistema de drenagem, as cargas de pressão atingem seus maiores valores em todos os piezômetros, similarmente ao observado nos ensaios de laboratório. Nos piezômetros P1 e P2, localizados na parte superior do modelo $Y = 20,50$ cm, as pressões registradas foram de 2,50 cm e 2,80 cm, respectivamente, o que indica uma pressão relativamente alta já nas camadas superiores. Nos piezômetros intermediários P3 e P4, as pressões aumentam significativamente para 18,30 cm e 18,10 cm, revelando o acúmulo de pressão à medida que se desce no perfil do modelo. No piezômetro P5, localizado no centro do modelo e na cota mais baixa $Y = 3$ cm, a pressão máxima foi registrada em 26,20 cm, indicando uma concentração de pressão nas camadas inferiores devido à ausência de drenagem. As pressões nos piezômetros P6 e P7, ambos localizados na cota mais baixa $Y = 3$ cm em posições laterais, foram de 8,10 cm e 3,90 cm, respectivamente, o que demonstra que a pressão diminui à medida que se afasta do centro do modelo. A vazão obtida para este modelo foi de 262,36 L/min, o que reflete uma alta resistência ao fluxo de água, contribuindo para o acúmulo de pressão no interior da estrutura.

No modelo com dreno de pé, observa-se uma redução significativa nas pressões, embora os valores ainda sejam consideravelmente altos em comparação com o sistema de filtro vertical e tapete drenante. Nos piezômetros P1 e P2, as cargas

de pressão apresentaram leve redução para 2,40 cm e 2,80 cm, respectivamente, sugerindo que o dreno de pé não exerce um impacto substancial nas camadas superiores. No entanto, nas camadas intermediárias P3 e P4, as pressões foram reduzidas para 13,90 cm e 13,70 cm, valores menores em relação ao modelo sem drenagem, o que indica que o dreno de pé melhora o escoamento da água nessas camadas. No piezômetro P5, a pressão foi reduzida para 25,10 cm, uma leve diminuição em relação ao modelo anterior, mas ainda uma carga significativa, o que mostra que o dreno de pé não é completamente eficiente na drenagem das camadas mais profundas. Nos piezômetros P6 e P7, as pressões foram de 5,20 cm e 2,10 cm, respectivamente, indicando uma redução considerável em relação ao modelo sem drenagem. A vazão registrada foi de 74,59 L/min, reduzindo parcialmente a pressão interna.

O modelo com filtro vertical e tapete drenante apresentou os melhores resultados em termos de dissipação de pressões. Nos piezômetros P1 e P2, as cargas de pressão caíram para 1,30 cm e 6,10 cm, respectivamente, valores significativamente mais baixos do que nos outros modelos. Nos piezômetros intermediários P3 e P4, as pressões foram quase totalmente eliminadas, com valores de 0,01 cm e 0,5 cm, respectivamente, o que demonstra a alta eficiência do sistema de drenagem. No piezômetro P5, a pressão foi reduzida drasticamente para 0,30 cm, evidenciando que o sistema de filtro vertical e tapete drenante foi capaz de eliminar praticamente toda a pressão acumulada nas camadas inferiores. Nos piezômetros P6 e P7, as pressões foram de 0,60 cm e 0,30 cm, respectivamente, confirmando a eficiência do sistema em controlar a pressão hidrostática em todas as regiões do modelo, com vazão registrada de 40,88 L/min, a menor entre todos os modelos, o que demonstra que o sistema de filtro vertical e tapete drenante não conseguiu controlar o fluxo de água de forma eficaz.

A análise comparativa entre os valores de vazão obtidos na modelagem numérica e no modelo físico de laboratório revela discrepâncias significativas que devem ser discutidas com base nas características e limitações de cada abordagem.

No caso do modelo sem sistema de drenagem, a vazão numérica encontrada foi de 262,36 L/min enquanto no modelo físico a vazão foi de 96,36 L/min. Esse erro relativo de aproximadamente 172,27% pode ser explicado por limitações na representação dos parâmetros do solo e das condições de contorno no modelo numérico. Modelagens numéricas muitas vezes simplificam certos aspectos, como a

heterogeneidade do solo ou a influência de microfissuras, o que pode resultar em uma superestimação da vazão em modelos sem drenagem.

Para o modelo com dreno de pé, os resultados numéricos indicaram uma vazão 74,59 L/min, enquanto a vazão no modelo físico foi ligeiramente maior, com 102,66 L/min. O erro relativo neste caso é de aproximadamente 27,34%, e a diferença pode estar associada a variações na eficiência do dreno de pé devido a pequenas diferenças na execução física, como o grau de compactação ou a porosidade do material utilizado no dreno. Em modelos numéricos, o comportamento do dreno pode ser idealizado, resultando em uma subestimação da vazão percolada.

Por fim, no modelo com filtro vertical e tapete drenante, o valor numérico de 40,88 L/min, este valor se aproxima mais do valor da modelagem física, com valor de 58,93 L/min, com um erro relativo de aproximadamente 30,63%. Essa menor discrepância pode indicar que o modelo numérico é mais eficiente em simular a presença de sistemas de drenagem mais complexos, como filtros verticais e tapetes drenantes, que distribuem melhor o fluxo de percolação. No entanto, ainda há uma superestimação da eficiência desse sistema no modelo numérico, o que pode ser explicado por idealizações no comportamento do fluxo através das camadas filtrantes e da interface entre o filtro e o tapete drenante.

4.5 VISUALIZAÇÃO DA REDE DE FLUXO PARA AS MODELAGENS NUMÉRICAS E LABORATORIAIS PARA OS DIFERENTES MODELOS

Diante das características apresentadas para os modelos de laboratório de barragem, foram determinadas as condições de contorno impostas aos modelos numéricos. No talude de montante, foi aplicada uma carga hidráulica de 25 cm de coluna d'água, do início do talude até a elevação do nível d'água, para representar a carga hidráulica imposta pelo reservatório do modelo. À jusante do maciço, foi imposta uma carga hidráulica de 8 cm de coluna d'água na saída dos drenos, representando o nível d'água nesta área.

Após a determinação das condições de contorno da seção e dos parâmetros geotécnicos necessários, foram realizadas as construções dos modelos físicos de barragem em laboratório. Esses modelos permitiram observar, em ambiente controlado, o comportamento hidráulico da barragem sob diferentes configurações de drenagem. Simultaneamente, foram executadas análises de percolação de água nos modelos, com o objetivo de determinar as linhas freáticas, vazões no interior do

maciço e poropressões, tanto laboratorialmente quanto por meio da modelagem numérica.

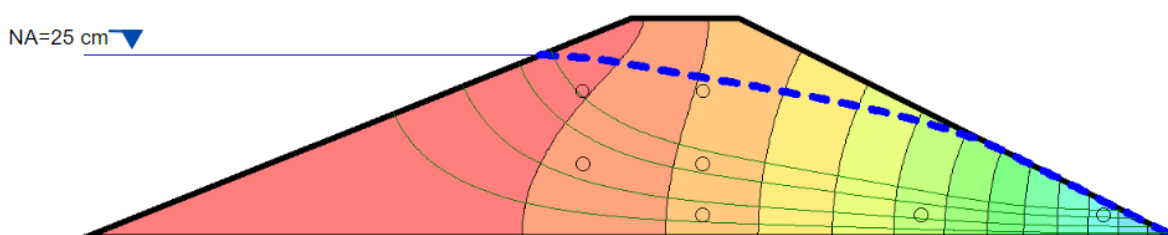
4.5.1 Modelo sem sistema de drenagem

A primeira etapa da modelagem numérica consistiu em analisar o comportamento do fluxo para o modelo sem sistema de drenagem. A Figura 42 ilustra a distribuição do fluxo de percolação através do modelo sem sistema de drenagem, evidenciada pela presença de linhas de fluxo e equipotenciais, representadas por gradientes de cores variando do vermelho ao azul. A linha azul pontilhada corresponde à linha freática, que separa a região saturada da região não saturada da barragem.

Os resultados obtidos demonstram que a percolação segue um padrão coerente com o modelo teórico e físico, esperado para esse tipo de estrutura, onde o fluxo é controlado pelo gradiente hidráulico e pela condutividade do material utilizado. As linhas de fluxo indicam que a água percola de montante para jusante, seguindo caminhos mais otimizados e de menor resistência.

A distribuição equipotencial, que aparecem como linhas mais próximas na parte inferior direita da figura, sugere que a percolação na região de jusante está bem controlada.

Figura 42 – Simulação das linhas de fluxo e equipotenciais no modelo numérico sem sistema de drenagem

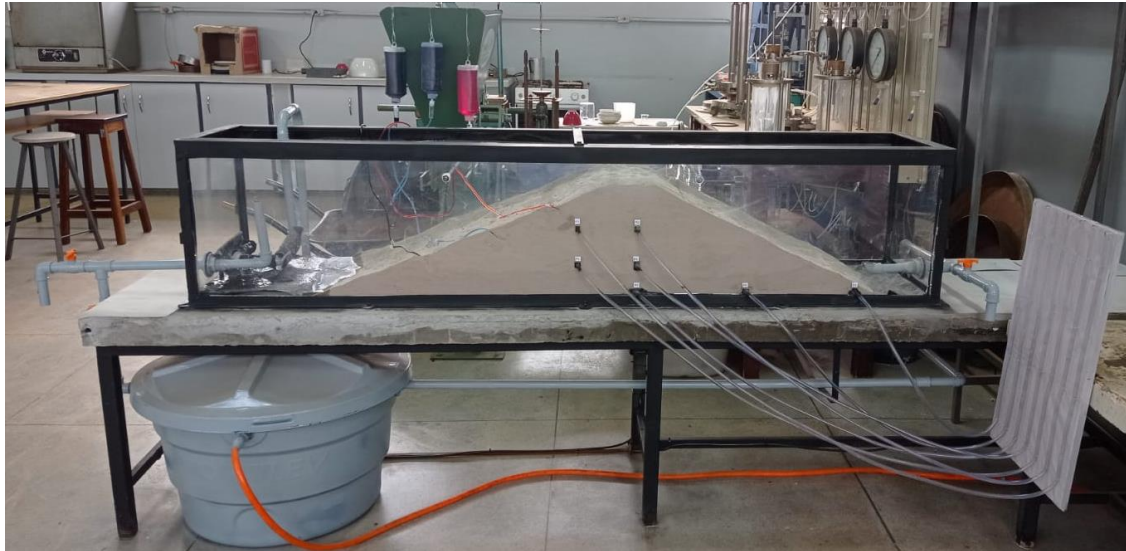


Fonte: O autor (2024).

A construção do modelo de laboratório sem sistema de drenagem, como ilustrado na Figura 43, foi uma etapa essencial para a validação dos resultados teóricos e numéricos. Esse modelo foi elaborado com o objetivo de simular uma barragem sem a implementação de mecanismos de drenagem, permitindo a análise do comportamento da água em sua percolação através do maciço. O processo construtivo seguiu todas as etapas necessárias para garantir a integridade e

representatividade do modelo, que inclui a preparação do material granular e o posicionamento dos piezômetros ao longo do modelo, a fim de monitorar as cargas piezométricas durante o experimento.

Figura 43 - Modelo de laboratório de barragem sem sistema de drenagem após todas as etapas construtivas



Fonte: O autor (2024).

Após a conclusão da construção, foi realizado o enchimento do tanque de percolação, conforme mostrado na Figura 44, onde se observa a estabilização do fluxo no modelo sem sistema de drenagem. A estabilização do fluxo foi essencial para garantir que os resultados obtidos fossem representativos de uma condição de regime permanente. As linhas de fluxo, evidenciadas pelo movimento da água e a coloração no modelo, permitem uma análise visual da percolação através do modelo de laboratório, demonstrando o caminho seguido pela água desde o talude de montante até a jusante, sem qualquer impedimento adicional conforme ocorreria na presença de sistemas de drenagem interna.

Figura 44 - Estabilização do fluxo para o modelo de laboratório sem sistema de drenagem



Fonte: O autor (2024).

Esses resultados, juntamente com os obtidos por meio de simulações numéricas (Figura 42), corroboram as observações teóricas. No modelo sem sistema de drenagem, a pressão hidrostática se acumula, especialmente nas camadas inferiores da barragem, como foi observado tanto nos ensaios experimentais quanto na modelagem numérica.

Embora ambas as abordagens – numérica e experimental – demonstrem um comportamento semelhante do fluxo em uma barragem sem drenagem, o modelo numérico fornece maior precisão na quantificação das linhas equipotenciais e dos gradientes hidráulicos. Em contrapartida, o modelo de laboratório destaca a importância da visualização direta do comportamento real dos fluidos, oferecendo análise visual que complementa as previsões teóricas. Essa correlação entre os resultados numéricos e experimentais fortalece a análise do comportamento hidráulico em barragens sem sistemas de drenagem, especialmente em termos de elevação do nível freático e do risco de saturação em áreas críticas do talude de jusante.

4.5.2 Modelo com dreno de pé

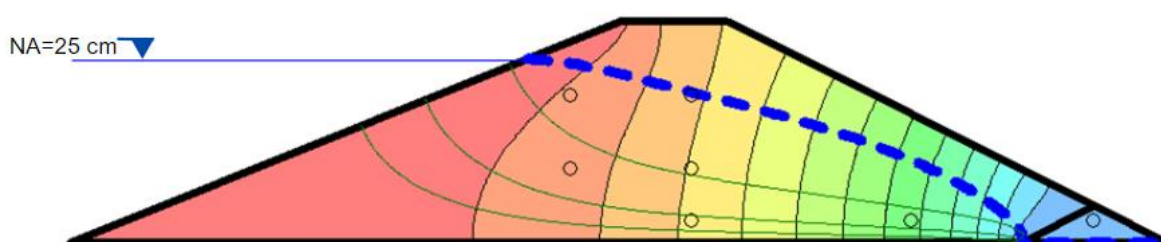
A Figura 45 ilustra a simulação numérica de fluxo de água através do modelo de laboratório de barragem com dreno de pé, onde se observam linhas de fluxo e equipotenciais.

O gradiente de cores que vai do vermelho ao azul demonstra a distribuição de pressão da água ao longo da barragem. As áreas vermelhas indicam as regiões com

maior pressão hidráulica, que vai diminuindo conforme a água se desloca em direção ao dreno, representada pelas áreas em azul. Isso evidencia que o dreno está cumprindo sua função de controlar a elevação da linha freática, canalizando o fluxo de água e reduzindo a pressão dentro da estrutura.

A linha freática, indicada pela linha azul tracejada, mostra que o nível de saturação da barragem está bem controlado pelo dreno de pé, prevenindo a acumulação de pressão hidrostática que poderia comprometer a estabilidade da estrutura.

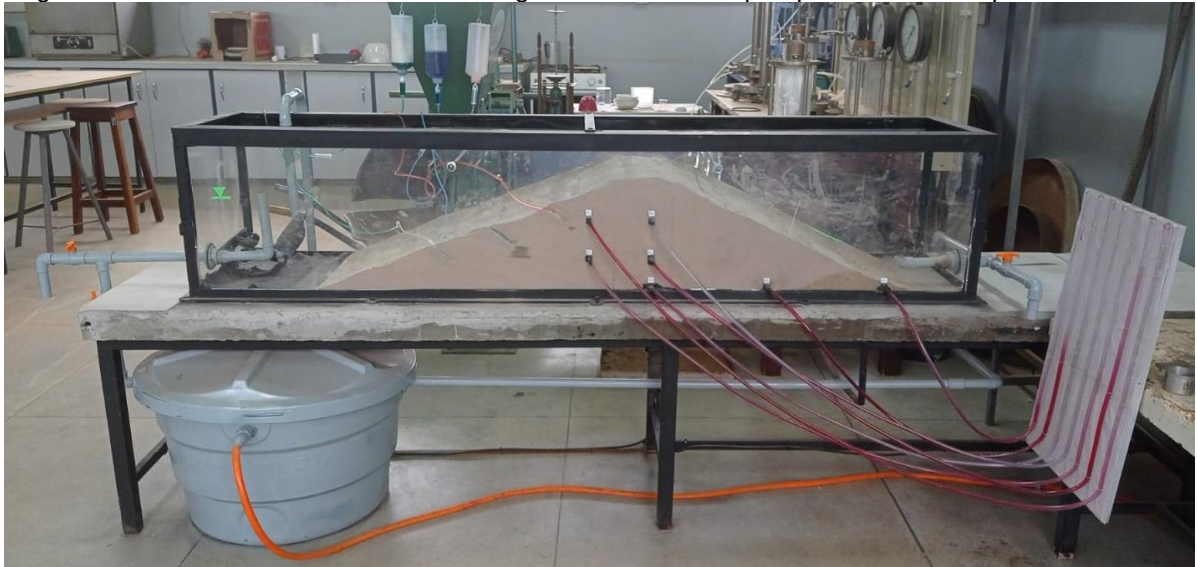
Figura 45 - Simulação das linhas de fluxo e equipotenciais no modelo numérico com dreno de pé



Fonte: O autor (2024).

A construção do modelo com sistema de drenagem com dreno de pé, seguiu os procedimentos semelhantes ao modelo sem sistema de drenagem, para garantir a representatividade e precisão dos ensaios, porém com a inclusão do mecanismo de dreno de pé no modelo, que impacta diretamente a distribuição das pressões hidrostáticas ao longo do maciço. A Figura 46 ilustra o modelo de laboratório de barragem após a finalização de todas as etapas construtivas, com o sistema de dreno de pé devidamente instalado.

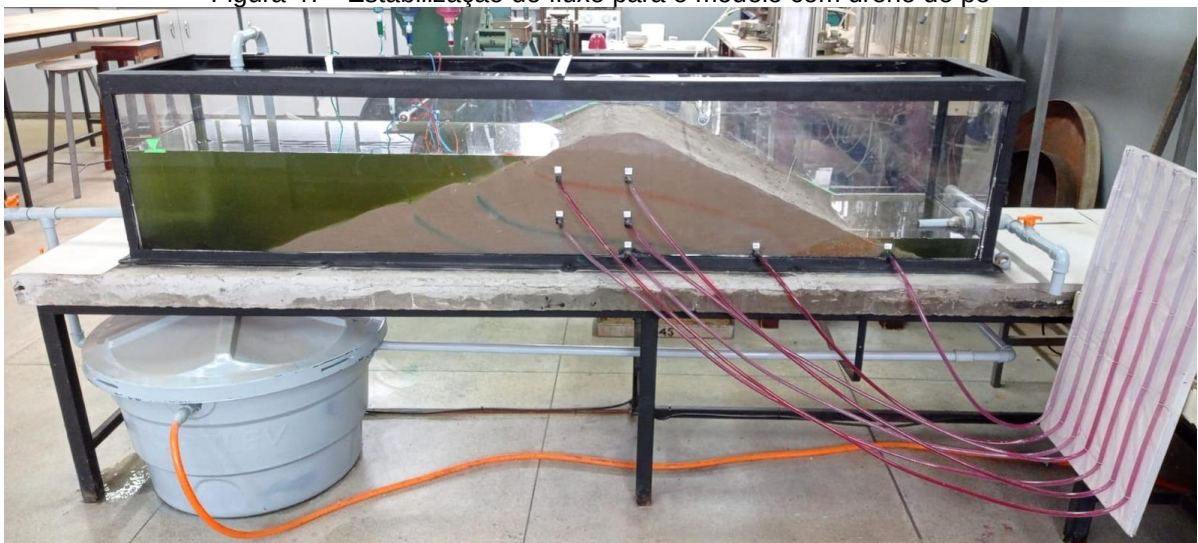
Figura 46 - Modelo de laboratório de barragem com dreno de pé após todas as etapas construtivas



Fonte: O autor (2024).

A Figura 47 apresenta um modelo físico de laboratório de uma barragem com dreno de pé, no qual foi utilizado corante para evidenciar o comportamento do fluxo de água através do maciço. Esse experimento permite observar, de forma direta, o efeito do dreno de pé na estabilidade hidráulica da barragem. A escolha do corante como marcador visual é particularmente eficiente para destacar o trajeto seguido pela água no interior do solo. Um dos principais aspectos observados é a atuação do dreno de pé na coleta e direcionamento do fluxo. A presença das linhas de fluxo concentradas na região próxima ao dreno reforça a eficácia desse dispositivo no controle da poropressão.

Figura 47 - Estabilização do fluxo para o modelo com dreno de pé



Fonte: O autor (2024).

Os resultados apresentados nas Figuras 45 e Figura 47 evidenciam uma comparação entre a modelagem numérica e o experimento físico de uma barragem com dreno de pé, proporcionando uma análise das características do fluxo de água através do maciço. Na Figura 45, a modelagem numérica exibe as linhas de fluxo e equipotenciais geradas para essa estrutura. A linha freática também é claramente identificada, destacada em azul, demarcando a zona de saturação no interior do maciço e o comportamento do fluxo ao longo da barragem e do dreno.

A análise das linhas de fluxo na modelagem numérica mostra uma distribuição gradual, com uma concentração mais densa na região próxima ao dreno, indicando que o dreno de pé atua de forma eficaz para reduzir o gradiente hidráulico e drenar o excesso de água da fundação da barragem. As equipotenciais, por sua vez, estão espaçadas conforme esperado em um cenário de escoamento constante, evidenciando a dissipação de energia ao longo do percurso.

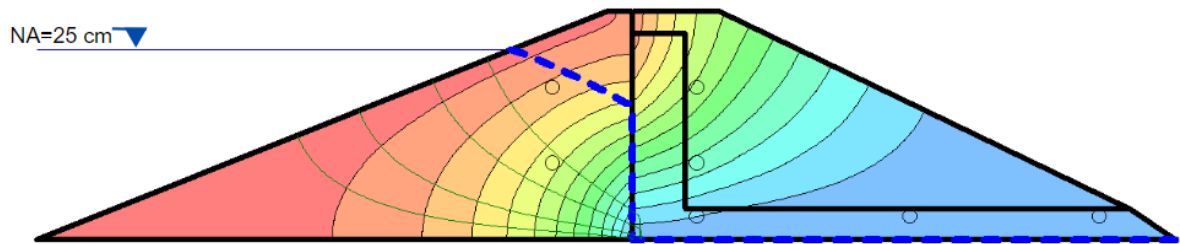
Por outro lado, na Figura 47, embora a precisão visual do modelo físico não seja tão refinada quanto a modelagem numérica, ele fornece uma representação realista e dinâmica do comportamento do fluxo, especialmente quando se trata de observar fenômenos como infiltração e dissipação de água ao longo do dreno de pé. O uso de corantes facilita a visualização do percurso do fluxo de água, confirmando a tendência observada na simulação numérica, onde há uma maior concentração de linhas de fluxo direcionadas ao dreno.

4.5.3 Modelo com filtro vertical e tapete drenante

A Figura 48 apresenta a simulação das linhas de fluxo e equipotenciais para o modelo numérico que inclui a presença do filtro vertical e do tapete drenante. Os resultados obtidos demonstram que a percolação segue um padrão coerente com o modelo teórico e físico esperado para esse tipo de estrutura. A simulação evidencia que a implementação do filtro vertical e do tapete drenante influencia diretamente a distribuição das linhas de fluxo e equipotenciais, controlando de forma eficaz a percolação de água através do talude.

A redução da poropressão, proporcionada pelo sistema de drenagem, é fundamental para aumentar a resistência ao cisalhamento do solo. A análise das linhas de fluxo sugere que as regiões críticas de acúmulo de água foram reduzidas, e a uniformidade das equipotenciais reflete um bom controle do fluxo.

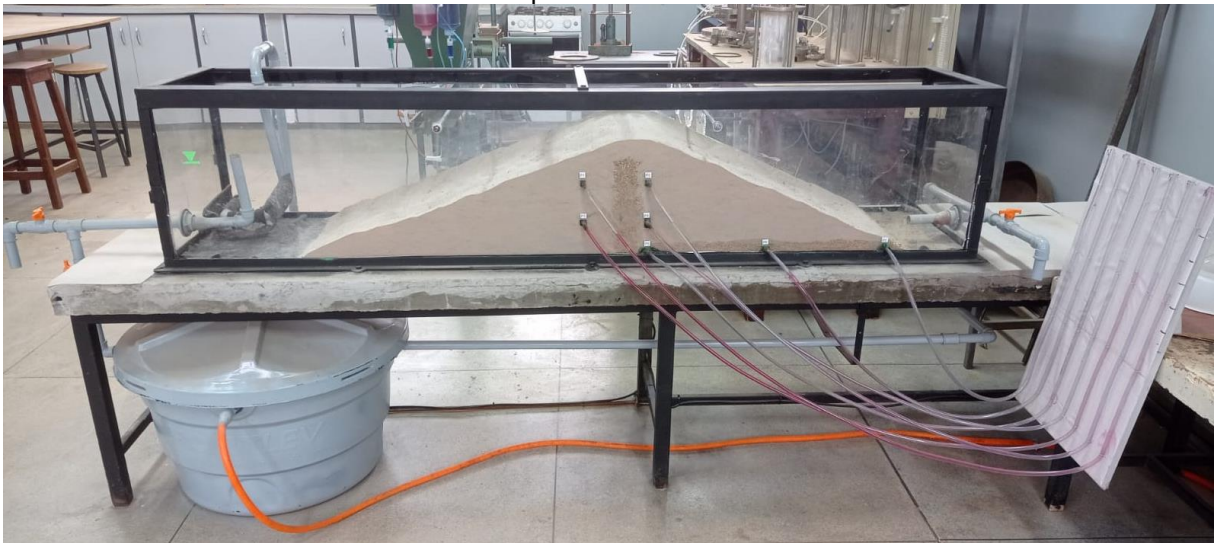
Figura 48 - Simulação das linhas de fluxo e equipotenciais no modelo numérico com filtro vertical e tapete drenante



Fonte: O autor (2024).

A construção do modelo de laboratório com filtro vertical e tapete drenante, ilustrado na Figura 49, foi concebida para analisar o desempenho de sistemas de drenagem com filtro vertical e tapete drenante em modelos de laboratório de barragem de terra, permitindo uma avaliação detalhada do comportamento do fluxo de água no maciço.

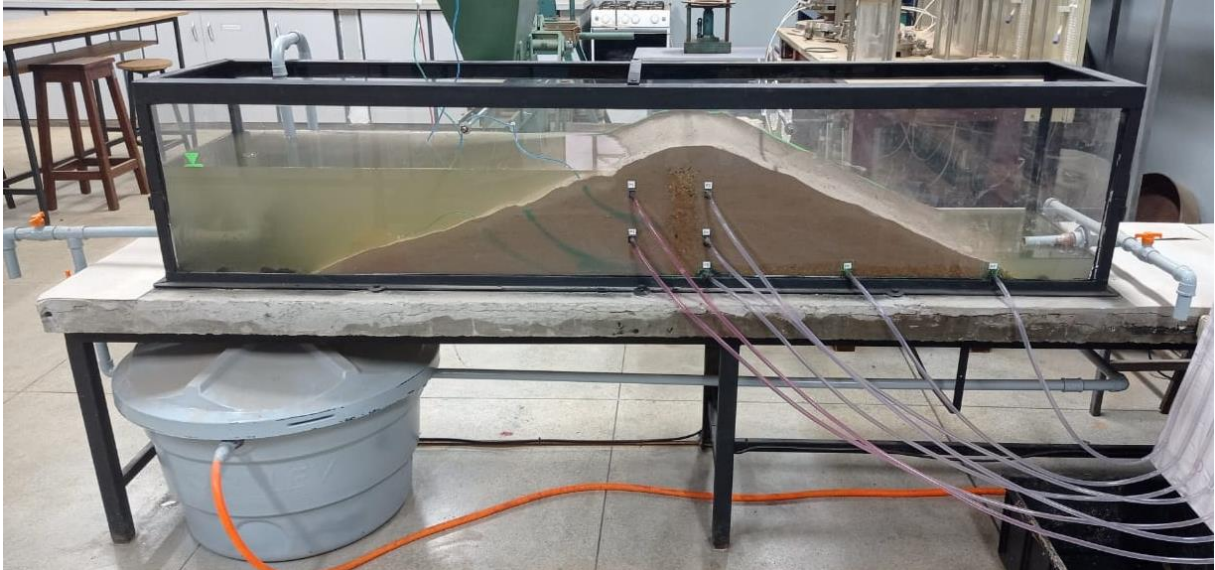
Figura 49 - Modelo de laboratório de barragem com filtro vertical e tapete drenante após todas as etapas construtivas



Fonte: O autor (2024).

A análise da Figura 50, que representa o modelo de laboratório de barragem com filtro vertical e tapete drenante, oferece uma compreensão prática do comportamento do fluxo d'água na estrutura. A principal observação desse experimento é a trajetória do fluxo, que segue padrões previsíveis, concentrando-se nas áreas de drenagem proporcionadas pelo filtro vertical e pelo tapete drenante.

Figura 50 - Estabilização do fluxo para o modelo com filtro vertical e tapete drenante



Fonte: O autor (2024).

Observa-se que a modelagem numérica oferece uma visão mais precisa e detalhada sobre os gradientes de potencial, permitindo prever com maior acurácia o comportamento hidráulico, enquanto o modelo físico serve como uma ferramenta de validação, apresentando uma análise prática e visual do comportamento do fluxo. Essa comparação reforça a importância da integração de diferentes metodologias para o estudo da segurança e da eficiência de barragens.

4.6 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A análise de estabilidade dos taludes é um aspecto crítico em projetos geotécnicos, sendo essencial a verificação dos Fatores de Segurança mínimos (FS_{mín}) em duas fases distintas: a fase final de construção e o regime permanente de operação. Para fins comparativos, foram adotados os valores de FS_{mín} presentes na literatura, especialmente aqueles recomendados para projetos dessa natureza. Esses parâmetros de referência estão descritos anteriormente no Quadro 3, que apresenta os Fatores de Segurança requeridos pela Eletrobrás para projetos de usinas hidrelétricas. O método de Morgenstern-Price foi escolhido para a análise de estabilidade por atender plenamente as condições de equilíbrio estático, contemplando o equilíbrio das forças verticais, horizontais, proporcionando uma avaliação que contemplasse as condições de segurança preconizados.

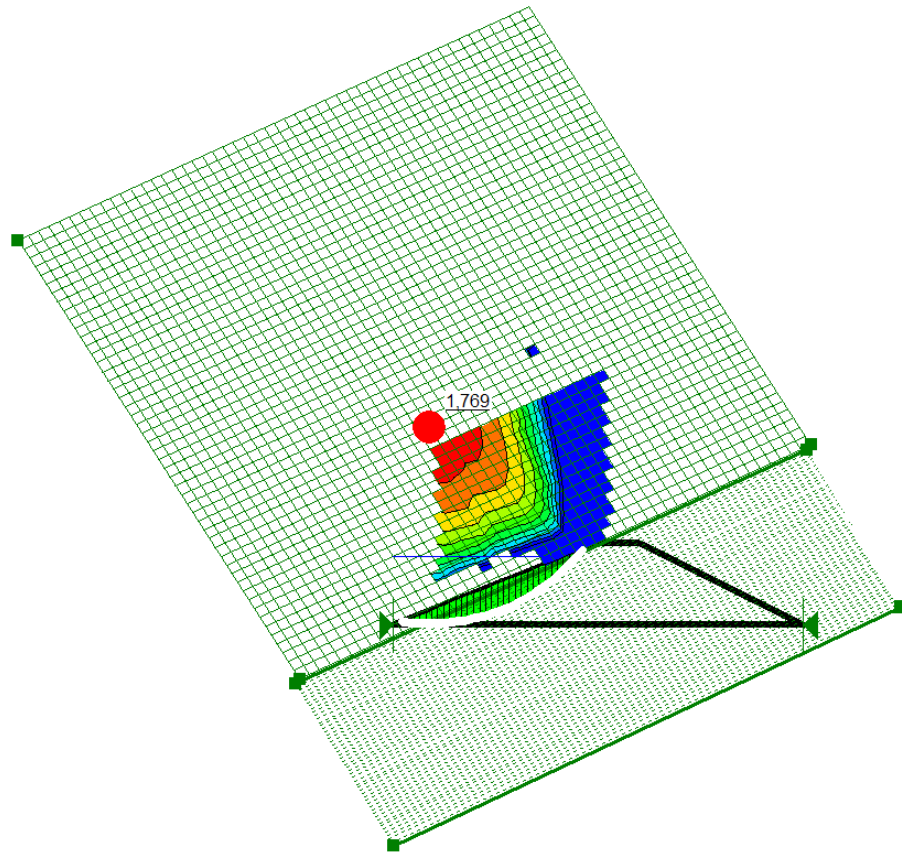
4.6.1 Final de Construção

A fase final de construção não é influenciada pela aplicação de carga hidráulica, uma vez que ocorre antes do enchimento do reservatório. Consequentemente, nesta etapa, a análise de estabilidade desconsidera os efeitos de poropressão e a percolação de água através do maciço. A seguir, são apresentados os resultados da análise de estabilidade para as faces de montante e jusante dos diferentes modelos. Cada figura destaca o Fator de Segurança (FS), com as respectivas áreas de ruptura potencial claramente delimitadas, proporcionando uma avaliação detalhada da integridade estrutural de cada modelo sob as condições analisadas.

As Figuras 51 e 52 apresentam os resultados da análise de estabilidade dos taludes de montante e jusante, respectivamente, para o modelo de barragem sem sistema de drenagem, considerando a fase final de construção. O Fator de Segurança (FS) calculado por meio do método de Morgenstern-Price é destacado em cada figura, fornecendo uma avaliação técnica sobre a integridade estrutural do maciço nas diferentes condições de talude.

Na Figura 51, que trata da análise de estabilidade do talude de montante, o Fator de Segurança (FS) obtido é 1,769. Esse valor é significativamente superior ao mínimo requerido para a estabilidade em projetos de barragens, o que indica que o talude de montante apresenta uma condição de segurança adequada durante a fase final de construção, mesmo sem a influência da carga hidráulica de operação.

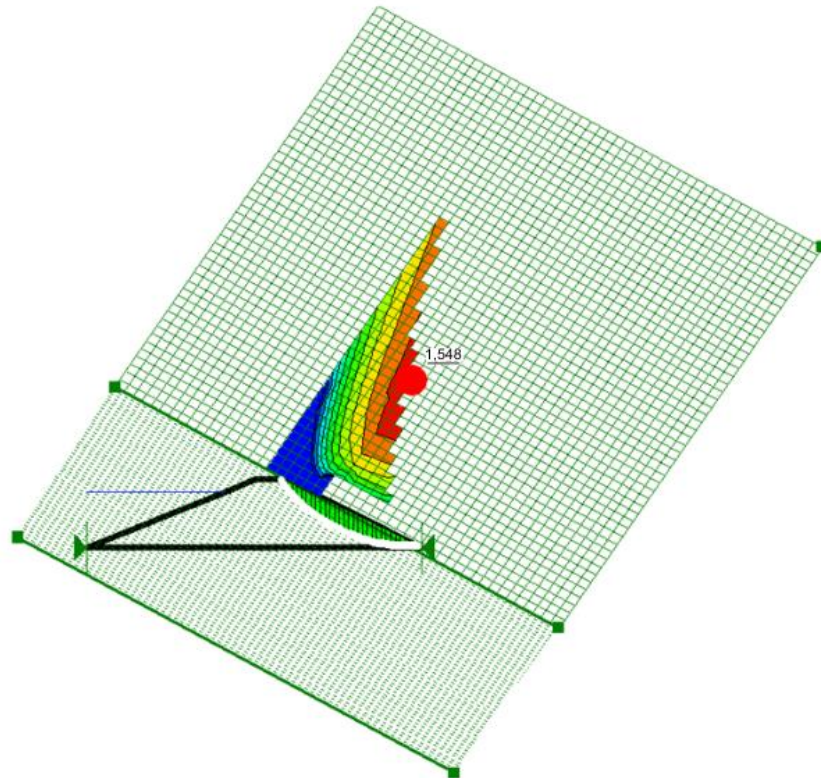
Figura 51 - Análise de estabilidade à montante para o modelo sem sistema de drenagem



Fonte: O autor (2024).

Já a Figura 52 mostra o talude de jusante, onde o Fator de Segurança calculado foi 1,548. Esse valor, embora inferior ao do talude de montante, ainda se encontra dentro dos limites aceitáveis para a estabilidade em condições de construção. No entanto, observa-se que a face de jusante, mesmo na fase final de construção, é mais suscetível à instabilidade em comparação com o talude de montante, especialmente devido à maior exposição à percolação de água na fase de operação subsequente.

Figura 52 - Análise de estabilidade à jusante para o modelo sem sistema de drenagem

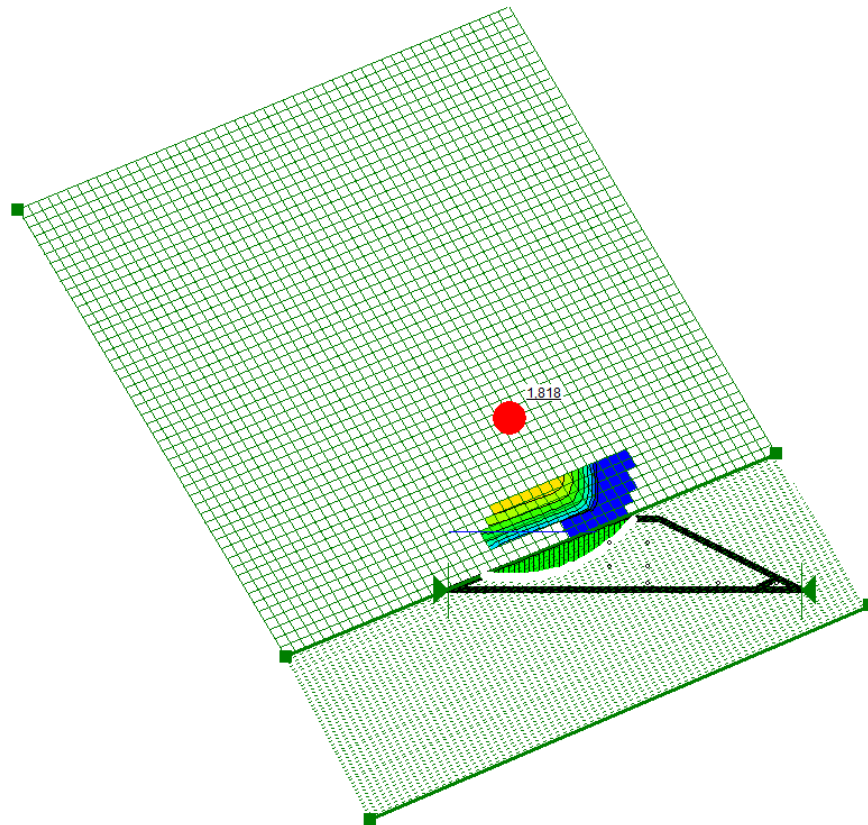


Fonte: O autor (2024).

As Figuras 53 e 54 apresentam os resultados da análise de estabilidade para os taludes de montante e jusante do modelo de barragem com dreno de pé, na fase final de construção.

Na Figura 53, que retrata a estabilidade do talude de montante, o Fator de Segurança (FS) obtido foi de 1,818. Esse valor reflete uma condição de segurança elevada para o talude de montante, indicando que o sistema com dreno de pé mantém o talude em uma situação estável mesmo na fase final de construção. Como o talude de montante ainda não está sujeito às pressões hidrostáticas nesta etapa, a resistência ao cisalhamento do solo é elevada, e o dreno de pé não impacta diretamente esta região do modelo, atuando de maneira mais significativa na drenagem do talude de jusante.

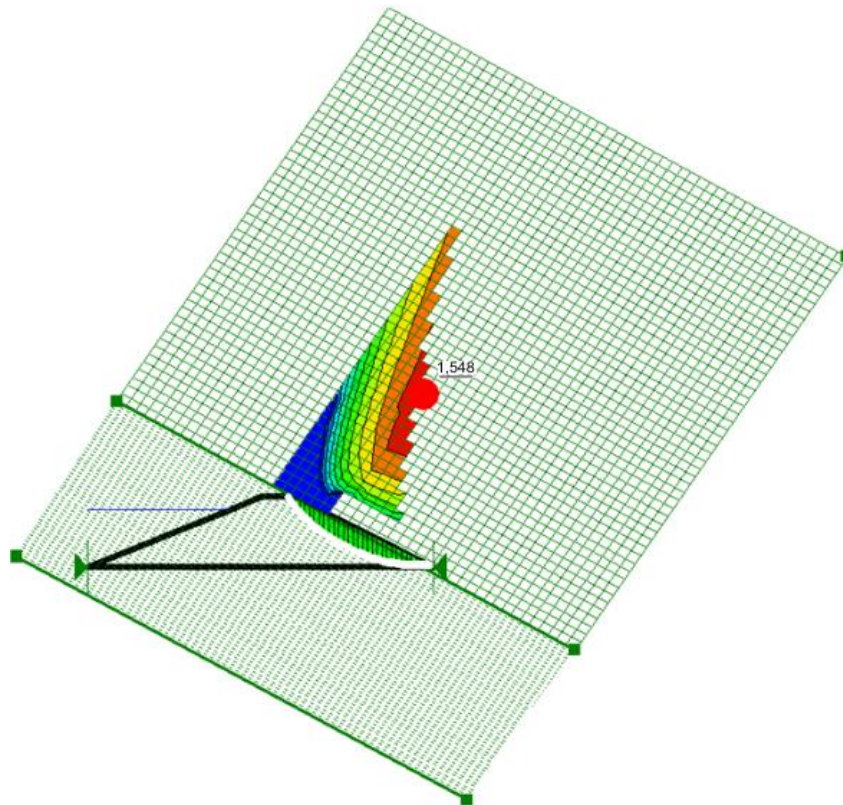
Figura 53 - Análise de estabilidade à montante para o modelo com dreno de pé



Fonte: O autor (2024).

A Figura 54 é apresentado o resultado para o talude de jusante, onde o Fator de Segurança foi de 1,548. Esse apresenta FS inferior ao do talude de montante, porém ainda dentro dos limites aceitáveis para projetos de barragens.

Figura 54 - Análise de estabilidade à jusante para o modelo com dreno de pé

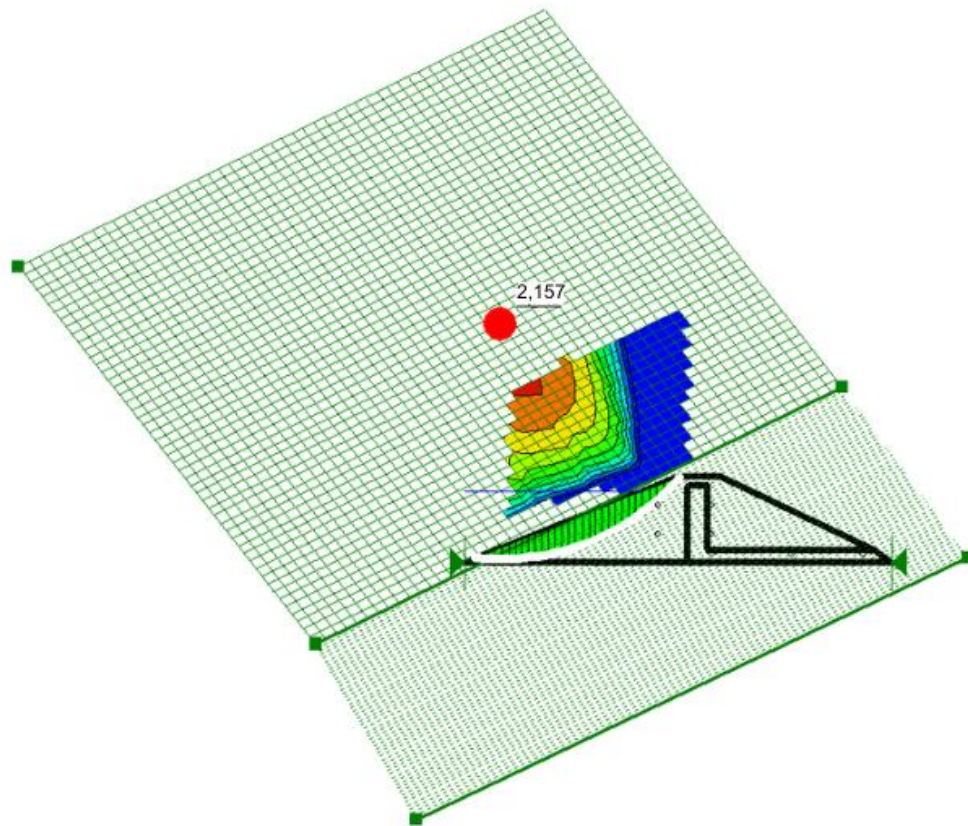


Fonte: O autor (2024).

As Figuras 55 e 56 apresentam os resultados da análise de estabilidade dos taludes de montante e jusante para o modelo de barragem equipado com filtro vertical e tapete drenante, na fase final de construção.

Na Figura 55, que apresenta o talude de montante, o Fator de Segurança obtido foi de 2,157. Esse valor reflete uma condição estável para o talude de montante durante a fase final de construção, mesmo antes da aplicação de carga hidráulica.

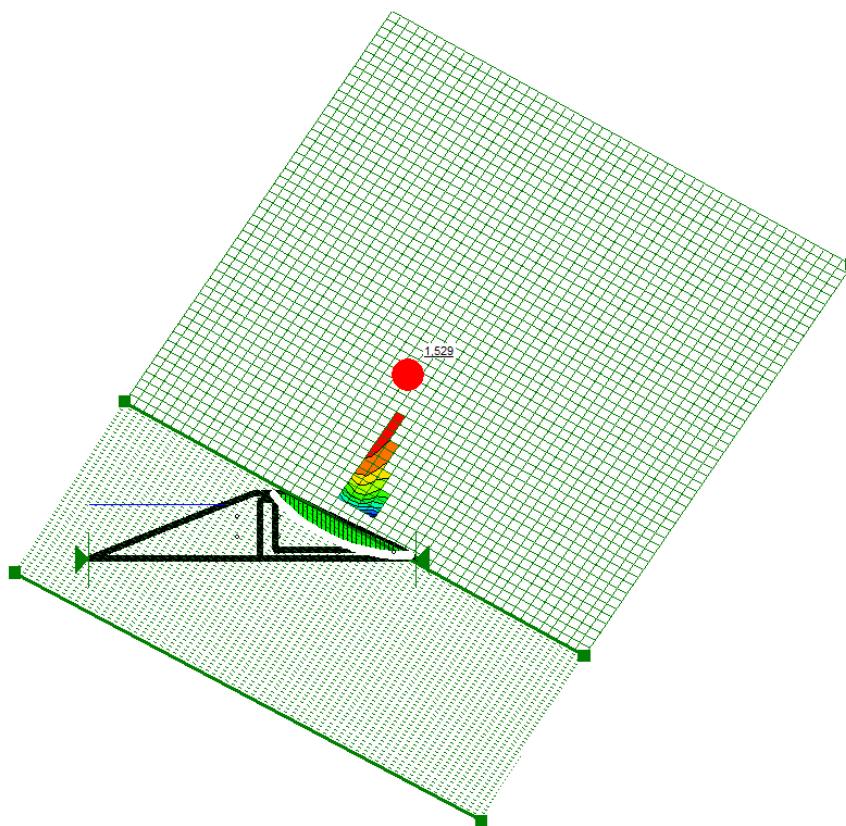
Figura 55 - Análise de estabilidade à montante para o modelo com filtro vertical e tapete drenante



Fonte: O autor (2024).

A Figura 56, referente ao talude de jusante, apresenta um Fator de Segurança de 1,529, indicando que a face de jusante está em uma condição mais vulnerável em comparação ao talude de montante. O valor de FS, embora inferior ao de montante, ainda se encontra dentro dos limites aceitáveis para a fase final de construção.

Figura 56 - Análise de estabilidade à jusante para o modelo com filtro vertical e tapete drenante



Fonte: O autor (2024).

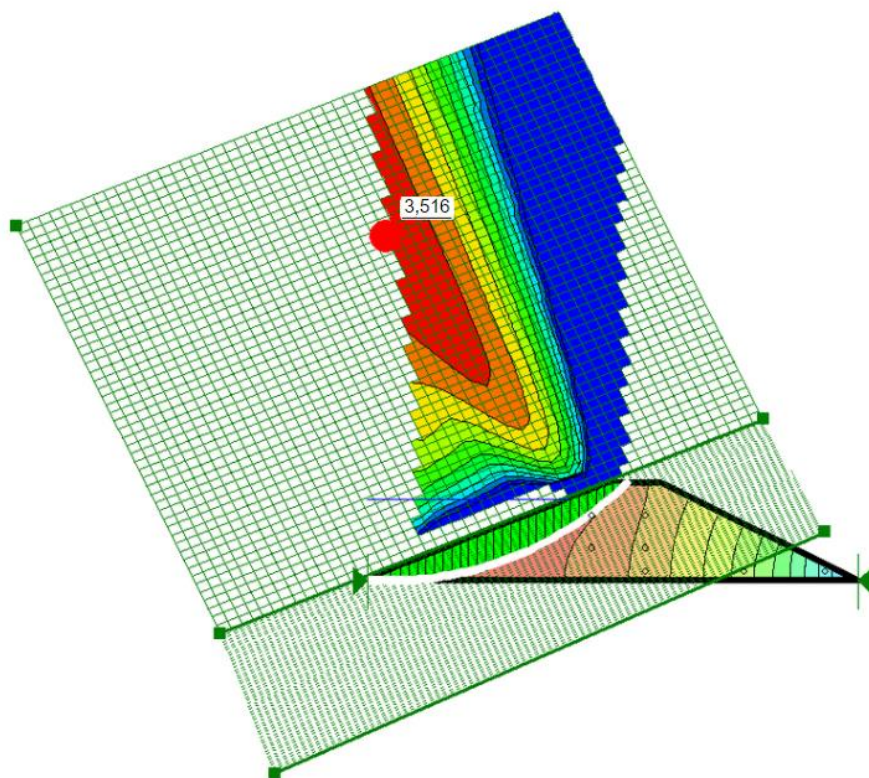
4.6.2 Regime permanente de operação

Nesta etapa, foram considerados os parâmetros hidráulicos relevantes, uma vez que a análise foi realizada com o nível do reservatório a 25 cm, simulando o período operacional dos modelos. Na avaliação da estabilidade global, a face de jusante apresentou maior suscetibilidade à instabilidade devido à saturação do solo, enquanto a face de montante, por sua vez, teve sua estabilidade reforçada pela própria carga hidráulica exercida pela coluna d'água. A seguir, são apresentados os resultados críticos de estabilidade, com foco nas áreas de maior vulnerabilidade identificadas na análise, conforme determinado pelo autor.

As Figuras 57 e 58 apresentam os resultados da análise de estabilidade para os taludes de montante e jusante do modelo de barragem sem sistema de drenagem, sob condições operacionais simuladas com o nível do reservatório a 25 cm, refletindo o comportamento do fluxo de percolação e os efeitos da carga hidráulica sobre o maciço. Esses resultados fornecem uma visão técnica detalhada da resposta do sistema ao regime de operação.

Na Figura 57, o Fator de Segurança (FS) do talude de montante é de 3,516, um valor elevado que indica uma estabilidade robusta dessa face. Esse resultado é consistente com o comportamento esperado, pois a carga hidráulica aplicada pela coluna d'água no reservatório contribui para estabilizar o talude de montante, ao aumentar a resistência ao cisalhamento do solo. O efeito estabilizador da carga de água no reservatório impede que tensões críticas se desenvolvam nessa face, reforçando a integridade estrutural do talude de montante durante o período operacional.

Figura 57 - Análise de estabilidade parente à montante para o modelo sem sistema de drenagem

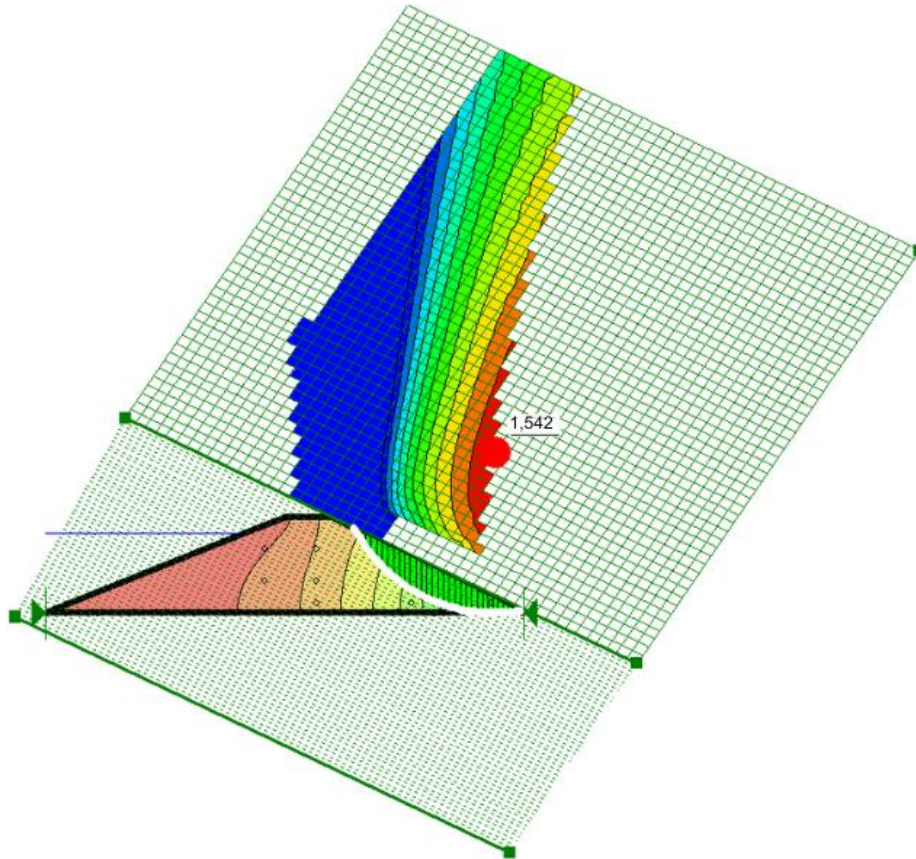


Fonte: O autor (2024).

Por outro lado, a Figura 58 apresenta o Fator de Segurança do talude de jusante, que é de 1,542. Esse valor, embora ainda esteja acima do limite mínimo de segurança, reflete uma condição de maior vulnerabilidade em comparação ao talude de montante. A face de jusante, exposta ao fluxo de percolação e à saturação do solo, torna-se mais suscetível à instabilidade devido ao acúmulo de poropressão nas camadas inferiores. A ausência de um sistema de drenagem adequado agrava essa condição, pois o solo saturado perde parte de sua capacidade de resistência ao

cisalhamento, o que compromete a estabilidade a longo prazo, especialmente sob condições operacionais prolongadas.

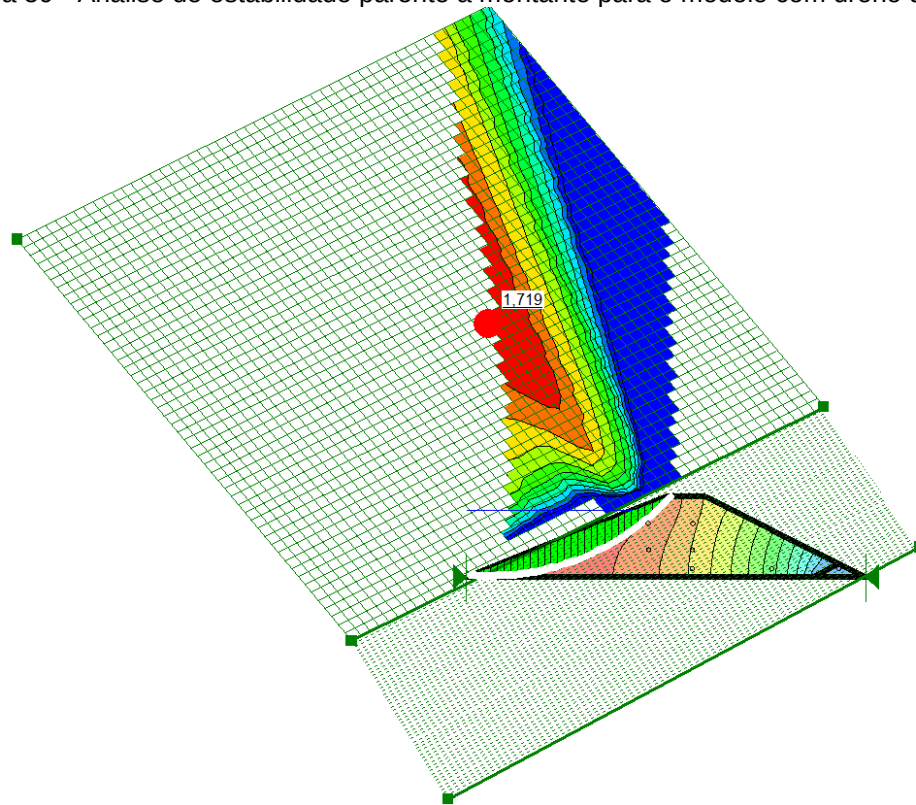
Figura 58 - Análise de estabilidade parente à jusante para o modelo sem sistema de drenagem



Fonte: O autor (2024).

Na Figura 59, referente à análise de estabilidade do talude de montante para o modelo com sistema de drenagem com dreno de pé, o Fator de Segurança (FS) calculado foi de 1,719. Esse valor demonstra uma condição estável para o talude de montante, mesmo com o nível de água em operação.

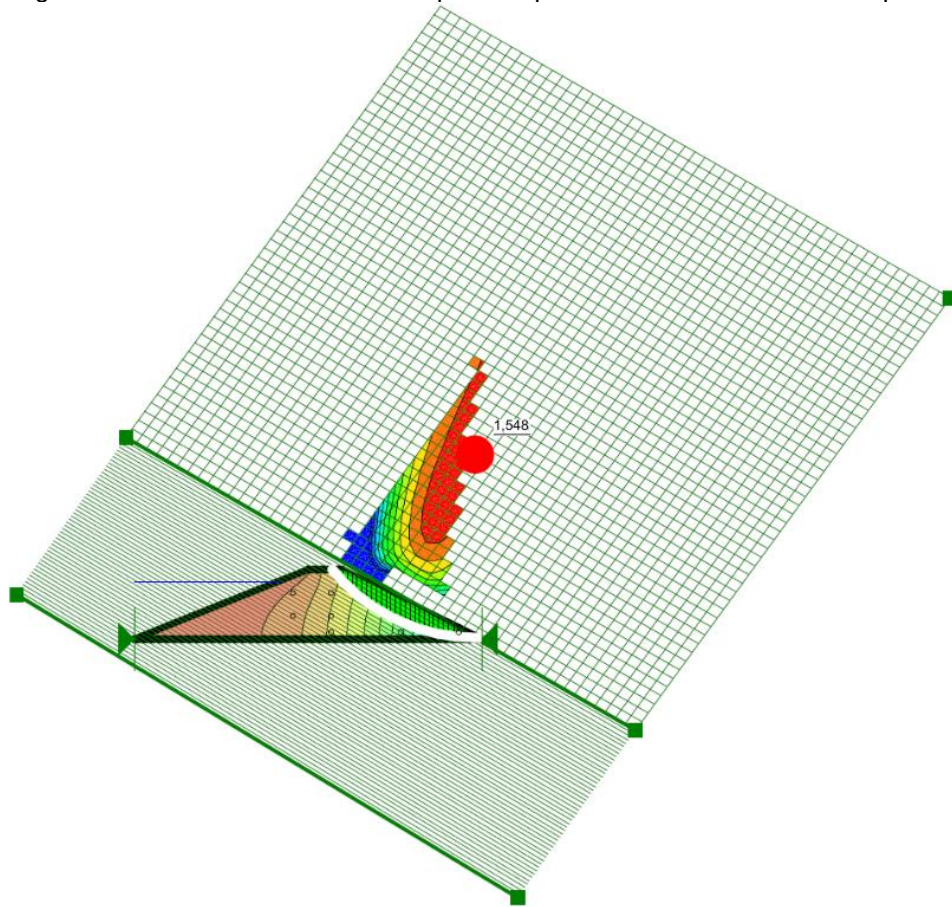
Figura 59 - Análise de estabilidade parente à montante para o modelo com dreno de pé



Fonte: O autor (2024).

A Figura 60 apresenta o resultado para o talude de jusante do dreno de pé, com um Fator de Segurança de 1,548. Este valor é inferior ao de montante, mas ainda está dentro dos limites aceitáveis para a operação segura do modelo de barragem.

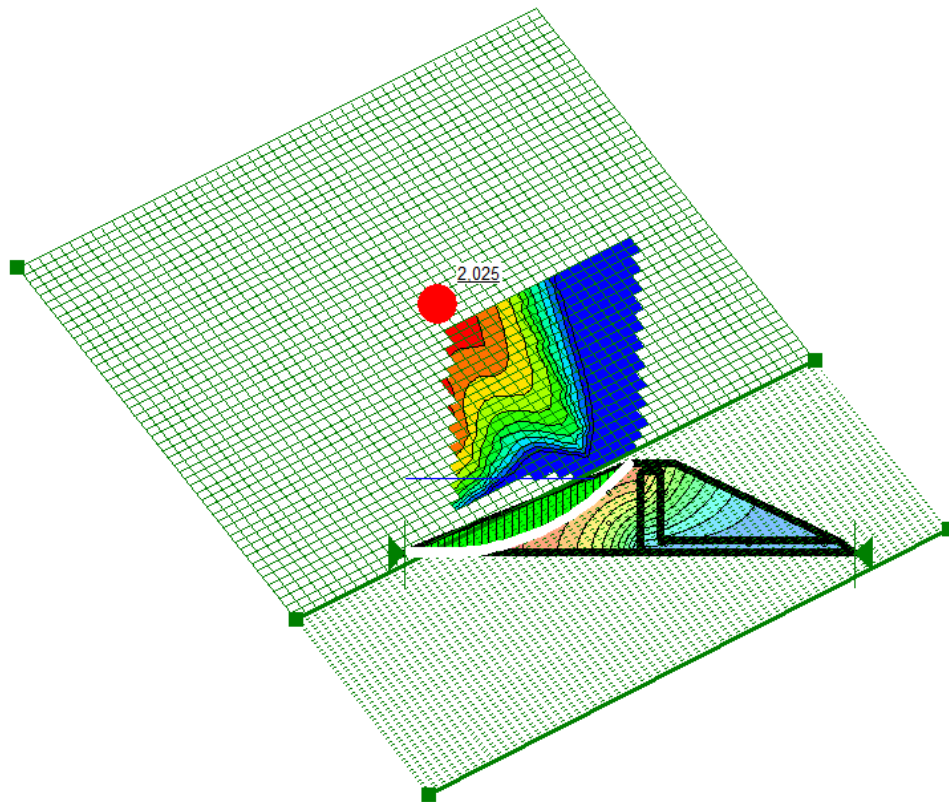
Figura 60 – Análise de estabilidade parente para o modelo com dreno de pé



Fonte: O autor (2024).

Na Figura 61 apresenta o resultado para o talude de jusante para o sistema de drenagem com filtro vertical e tapete drenante. O Fator de Segurança (FS) do talude de montante do modelo foi estimado em 2,025. Esse valor indica que o sistema está atuando com eficiência em manter a integridade do talude, sendo o filtro vertical e o tapete drenante auxiliares indiretos na manutenção da estabilidade, ao controlar o fluxo de água na estrutura.

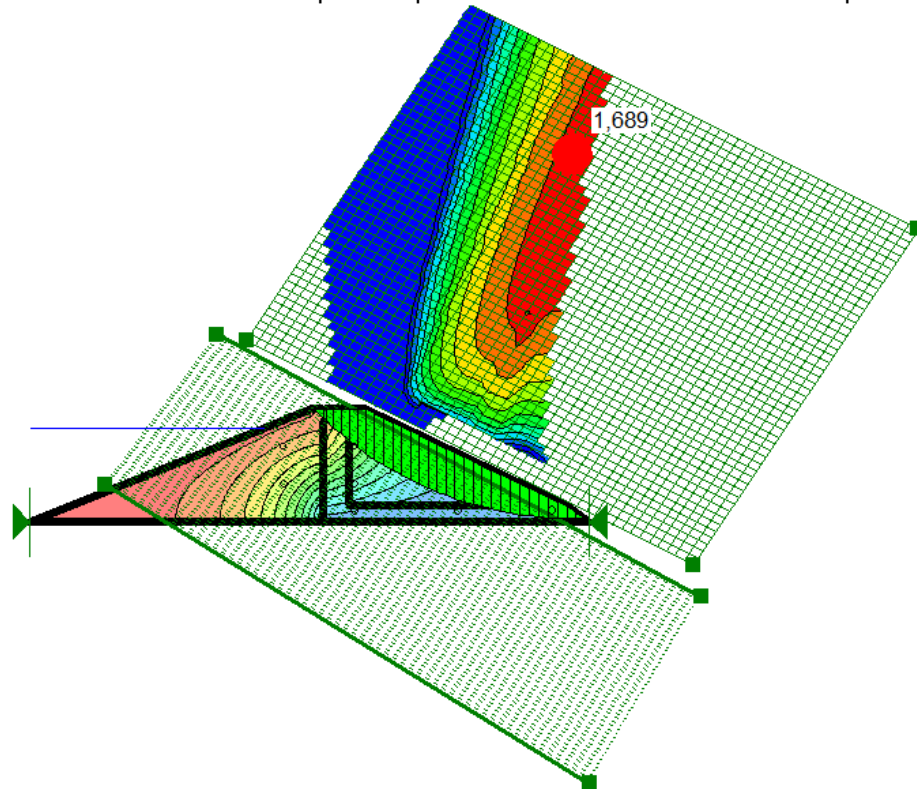
Figura 61 – Análise de estabilidade parente para o modelo com filtro vertical e tapete drenante



Fonte: O autor (2024).

A Figura 62 apresenta Fator de Segurança para o talude de jusante de 1,689. Esse valor reflete a capacidade do filtro vertical e do tapete drenante de reduzir as pressões hidrostáticas no talude de jusante, elemento crítico em barragens. A presença do tapete drenante proporciona uma rota eficiente para o fluxo de água, reduzindo significativamente o risco de saturação e, por consequência, a possibilidade de deslizamento ou falha.

Figura 62 - Análise de estabilidade parente para o modelo com filtro vertical e tapete drenante



Fonte: O autor (2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho contemplou a execução de modelos físicos de laboratório e a realização de análises numéricas, a fim de avaliar a utilização de diferentes sistemas de drenagem e modelos de laboratório de barragem de terra. Dos resultados obtidos no estudo, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

- Considerando o traçado das linhas de fluxo observa-se que os métodos apresentam concordância entre si, sendo cumprido o objetivo de observar a similaridade cinemática do fluxo entre os diferentes modelos.
- As análises realizadas através do modelo físico e do modelo numérico se mostraram satisfatórias, em que se obteve comportamento simulado no modelo físico e pelas análises numéricas.
- Nota-se que a barragem sem o sistema de drenagem interno (filtros) possui o risco de ocorrência de *piping*, devido ao fato de a água poder aflorar à jusante,

o que compromete a segurança da mesma. Dessa forma, tem-se que os filtros vertical e horizontal controlam o fluxo de água pelo maciço.

- Apesar destes aspectos, pode-se dizer que os resultados obtidos com o trabalho foram satisfatórios e sugerem a viabilidade do uso de modelos físicos para estudo do fluxo d'água no interior dos modelos de barragens.
- Novamente ressalta-se que a opção pela utilização da areia, apesar de não representar a realidade de execução de barragens, constitui-se na abordagem mais viável para experimentos em escala de laboratório. Isto porque a areia possui maior permeabilidade quando comparada aos solos coesivos, sendo possível sua utilização uma vez que o que se deseja é manter a similaridade cinemática entre os fluxos.
- Conclui-se então, com a segurança estabelecida, que os resultados obtidos através das análises foram satisfatórios, indicando um comportamento adequado dos modelos de laboratório de barragem para a etapa de N.A à 25 cm.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

- Repetição das análises numéricas com modelos tridimensionais;
- Avaliar, em modelos físicos e numéricos, o comportamento do modelo de laboratório de barragem a partir da adoção de drenos franceses transversais;
- Compilar as informações obtidas neste e em futuros trabalhos objetivando criar uma análise comparativa entre diferentes configurações de sistemas de drenagem;
- Aplicação de transdutores de pressão digitais em substituição aos piezômetros de mangueira;
- Utilização de diferentes geometrias para os modelos;
- Para eventuais estudos, é indicado a análise em situações de rebaixamento rápido, e em efeitos sísmicos;
- Realizar análises para diferentes composições de materiais, investigando o comportamento deles submetidos a diferentes carregamentos; como também a realização de análises para condição de regime transiente.

REFERÊNCIAS

Anibele, R. (2019). **Análise em modelo de laboratório da substituição de filtro de areia por geocomposto em barragens de terra.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Bowles, J. E. (1996). **Foundation Analysis and Design.** McGraw-Hill.

Casagrande, A. (1937). **Seepage through dams.** Journal of the New England Water Works Association, Vol. 51, No. 2, p. 131-172.

Cruz, P. T. (2004). **100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto.** São Paulo: Editora Oficina De Textos Brasil, 2ª Edição.

Das, B. M. (2013). **Princípios de Engenharia de Fundações.** São Paulo: Cengage Learning.

Estudo Experimental e numérico de problemas de percolação em modelo reduzido. (2013). Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Geotecnia, FEUP, Porto.

Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC. (2013). Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. I.].

Foster, M.; Fell, R.; Spannagle, M. (1998). **Analysis of embankment dam incidents.** UNICIV Report N° R-374 - UNSW, Sydney, Austrália.

Ferreira, C. R. C. D. P. (2008). **Desenvolvimento de um equipamento laboratorial para o estudo de problemas de percolação em modelo reduzido.** Dissertação de mestrado, Especialização em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Gaioto, Nélio. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento.** São Carlos: EESC-USP.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). **An Introduction to Geotechnical Engineering.** Pearson.

International Commission on Large Dams (ICOLD), (2018). Bulletin 164 - Types of Dams.

Massad, F. (2010). **Obras de Terra. 2ª ed.** São Paulo: Editora Oficina de Textos.

Mendonça, M. B. de. (2012). **Notas de aula da disciplina Obras de Terra.** UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro.

Monografia. (2019). **Avaliação da Segurança de Barragens.** Universidade Federal de Ouro Preto.

Unas, M. S. P. (2010). **A percolação de água em solos. Estudos em modelo reduzido.** In: 4as. Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, pp. 167-171. ISBN: 978-989-95557-3-0. Apresentação das Barragens. (2019). [S. l.].

United States Army Corps of Engineers, (2018). Engineering Circular No. 1110-2-1150 - Rockfill Dams.

U.S. Bureau of Reclamation. (2019). Engineering Monograph No. 20 - Earth Dams and Reservoirs.

Pinto, C. S. (2006). **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3ª ed.** São Paulo: Editora Oficina de Textos.

População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU. (2019). [S. l.].

Rico, M., Benito, G., & Díez-Herrero, A. (2008). **Floods from Tailings Dam Failures.** Journal of Hazardous Materials, 154(1-3), 79-87.

Schneider, S. A. (2014). **Avaliação da estabilidade de taludes em solos residuais de basalto.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul.

Silva, F. C. (2019). **Estudo sobre instrumentação de barragens de terra: análise e interpretação de dados.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Smith, A. (2015). **Engineering Techniques for Rockfill Dams.** PublisherName.

Tonus, B. P. A. (2009). **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

Vick, S.G. (1990). **Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams.** BiTech Publishers Ltd.