

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO E DA DRENAGEM INTERNA NA
ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA DE PEQUENO PORTE

JOÃO PEDRO COSTA FONTANELLA

JUIZ DE FORA

2025

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO E DA DRENAGEM INTERNA NA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA DE PEQUENO PORTE

JOÃO PEDRO COSTA FONTANELLA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Geotecnia

Orientadora: Prof.(a) Tatiana Tavares Rodriguez

Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia da UFJF
2025

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO E DA DRENAGEM INTERNA NA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA DE PEQUENO PORTE

JOÃO PEDRO COSTA FONTANELLA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 18/06/2025

Por:

Documento assinado digitalmente
 **TATIANA TAVARES RODRIGUEZ**
Data: 18/06/2025 11:12:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Tatiana Tavares Rodriguez, D.Sc (Orientadora)
Universidade Federal de Juiz de Fora/Departamento de Transportes e Geotecnia

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME SOLDATI FERREIRA**
Data: 20/06/2025 10:37:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Guilherme Soldati Ferreira, M.Sc (Examinador 01)
Universidade Federal de Juiz de Fora/Departamento de Transportes e Geotecnia

Documento assinado digitalmente
 **JONATHAN DO AMARAL BRAZ**
Data: 18/06/2025 11:24:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Jonathan do Amaral Braz, M.Sc (Examinador 02)
Universidade Federal de Juiz de Fora / PPGMC

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todos que estiveram presentes nesta jornada significativa em minha vida acadêmica.

Agradeço, em primeiro lugar, à minha mãe e irmã, cujo amor inabalável e apoio constante foram a luz que iluminou cada etapa deste caminho. Suas palavras de incentivo e celebração das minhas conquistas foram o combustível que impulsionou cada avanço. Mesmo na ausência física do meu pai, sinto sua presença em cada vitória, e sei que ele estaria orgulhoso neste momento. A família é verdadeiramente o alicerce dos nossos sonhos, e vocês são o meu maior orgulho.

À Ana Luíza, expresso minha sincera gratidão por sua presença constante, amor e apoio incansável. Obrigado por me inspirar e por caminhar ao meu lado em cada desafio.

Agradeço também aos familiares e amigos que compartilharam comigo risadas, desafios e triunfos ao longo desta jornada. Cada momento compartilhado é um tesouro que guardarei para sempre, lembrando-me da importância da amizade e do apoio mútuo.

À minha estimada orientadora Tatiana Tavares Rodriguez, expresso minha mais profunda gratidão por sua orientação sábia, apoio inabalável e comprometimento em meu crescimento acadêmico e pessoal. Seus conselhos foram inestimáveis para moldar este trabalho e para o meu desenvolvimento como acadêmico.

A todos que contribuíram para o meu crescimento e sucesso, meu mais sincero agradecimento. Hoje, celebramos não apenas a conclusão desta etapa, mas também a jornada repleta de aprendizado, apoio e amizade que tornaram tudo possível.

“O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria, se aprende é com a vida e com os humildes.”

-Cora Coralina

RESUMO

A crescente preocupação com a segurança de barragens de terra, impulsionada por eventos críticos e pela necessidade de atender às exigências legais e ambientais, motiva estudos que busquem soluções técnicas eficazes para garantir sua estabilidade. Dentre os fatores mais relevantes para a segurança estrutural estão a eficiência dos sistemas de drenagem interna e a qualidade da compactação do solo, cuja combinação adequada pode evitar a falha da estrutura. Este trabalho apresenta uma avaliação da eficiência de diferentes modelos de drenagem interna aplicados a barragens de terra homogêneas de pequeno porte, com o objetivo de analisar o impacto dessas soluções sobre a estabilidade da estrutura. São considerados sistemas de drenagem horizontal (tapete drenante) e vertical (filtro chaminé), além da variação da energia de compactação do solo entre níveis normal e intermediário. A metodologia envolveu modelagem computacional utilizando os módulos SEEP/W e SLOPE/W do software GeoStudio®, permitindo a análise do fluxo de percolação e da estabilidade dos taludes de montante e jusante. Os resultados indicaram que a presença de drenagem interna proporciona aumentos expressivos no fator de segurança, especialmente no talude de jusante, sendo que a drenagem vertical associada à compactação intermediária apresentou o melhor desempenho. Em contrapartida, a ausência de drenagem resultou em fatores de segurança insuficientes, mesmo com maior energia de compactação. Conclui-se que a combinação entre drenagem eficiente e compactação adequada é essencial para garantir a segurança e a longevidade das barragens de terra homogêneas.

Palavras-chave: Barragem de terra; Drenagem interna de barragens; Estabilidade de taludes.

ABSTRACT

The growing concern regarding the safety of earth dams, driven by critical incidents and the need to comply with legal and environmental requirements, has motivated studies aimed at finding effective technical solutions to ensure their stability. Among the most relevant factors for structural safety are the efficiency of internal drainage systems and the quality of soil compaction, whose proper combination can prevent structural failure. This study presents an evaluation of the efficiency of different internal drainage models applied to small homogeneous earth dams, aiming to analyze the impact of these solutions on structural stability. Horizontal drainage systems (drainage blanket) and vertical drainage systems (chimney filter) were considered, along with variations in soil compaction energy at normal and intermediate levels. The methodology involved computational modeling using the SEEP/W and SLOPE/W modules of the GeoStudio® software, allowing the analysis of seepage flow and the stability of the upstream and downstream slopes. The results indicated that the presence of internal drainage leads to significant increases in the safety factor, especially on the downstream slope, with vertical drainage combined with intermediate compaction presenting the best performance. Conversely, the absence of drainage resulted in insufficient safety factors, even with higher compaction energy. It is concluded that the combination of efficient drainage and proper compaction is essential to ensure the safety and longevity of homogeneous earth dams.

Keywords: Dam; Internal drainage of dams; Slope stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Configuração de Barragem construída em etapa única	17
Figura 2 - Classificação das barragens cadastradas no SNISB por porte e material de construção	18
Figura 3 - Representação do filtro vertical	20
Figura 4 - Representação do dreno horizontal	21
Figura 5 - Representação do dreno de pé	21
Figura 6 - Zonas de Koppen para o município de Juiz de Fora	25
Figura 7 - Precipitação e Evapotranspiração média para o município de Juiz de Fora	26
Figura 8 - Vazão por metro linear	40
Figura 9 - Seção transversal da barragem	43
Figura 10 - Local de retirada do solo (PROINFA)	45
Figura 11 - Curva Granulométrica do solo argiloso	45
Figura 12 - Condições de contorno aplicadas	47
Figura 13 - Superfície de pesquisa. a) Montante. b) Jusante	48
Figura 14 - Linhas de fluxos obtidas no SEEP/W	49
Figura 15 - Configuração sem drenagem e Energia normal (Análise de Fluxo)	50
Figura 16 - Configuração sem drenagem e Energia normal (Talude de Jusante)	50
Figura 17 - Configuração sem drenagem e Energia normal (Talude de Montante)	51
Figura 18 - Configuração sem drenagem e Energia intermediária (Análise de Fluxo)	51
Figura 19 - Configuração sem drenagem e Energia intermediária (Talude de Jusante)	52

Figura 20 - Configuração sem drenagem e Energia intermediária (Talude de Montante)	52
Figura 21 - Configuração de Filtro horizontal e Energia normal (Análise de fluxo)	53
Figura 22 - Configuração de Filtro horizontal e Energia normal (Talude de Jusante)	53
Figura 23 - Configuração de Filtro horizontal e Energia normal (Talude de Montante)	54
Figura 24 - Configuração de Filtro horizontal e Energia intermediária (Análise de Fluxo)	55
Figura 25 - Configuração de Filtro horizontal e Energia intermediária (Talude de Jusante)...	55
Figura 26 - Configuração de Filtro horizontal e Energia intermediária (Talude de Montante)	55
Figura 27 - Configuração de Filtro vertical e Energia normal (Análise de Fluxo)	57
Figura 28 - Configuração de Filtro vertical e Energia normal (Talude de Jusante)	57
Figura 29 - Configuração de Filtro vertical e Energia normal (Talude de Montante)	57
Figura 30- Configuração de Filtro vertical e Energia intermediária (Análise de fluxo)	58
Figura 31 - Configuração de Filtro vertical e Energia intermediária (Talude de Jusante)	59
Figura 32 - Configuração de Filtro vertical e Energia intermediária (Talude de Montante)....	59
Figura 33 - Fluxo de água na drenagem horizontal (energia normal)	60
Figura 34 - Fluxo de água na drenagem vertical (energia normal)	61
Figura 35 - Fluxo de água na drenagem horizontal (energia intermediária)	61
Figura 36 - Fluxo de água na drenagem vertical (energia intermediária)	62
Figura 37 - Comparação do Fator de Segurança para os diferentes cenários.....	63

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Distribuição de barragens por função no Brasil	18
Quadro 2 - Características Técnicas (CT)	28
Quadro 3 - Estado de Conservação (EC).....	29
Quadro 4 - Plano de Segurança da Barragem (PSB).....	30
Quadro 5 - Potencial de Dano Ambiental (PDA).....	31
Quadro 6 - Faixas de classificação da categoria de risco	32
Quadro 7 - Classificação da barragem quanto ao potencial de dano ambiental.....	32
Quadro 8 - Matriz de classificação da barragem	32
Quadro 9 - Critério de Filtro para Cruz (1996)	38
Quadro 10 - Critério de Filtro USACE (1986).....	41
Quadro 11 - Critérios de Filtro segundo USACE (1986).....	42
Quadro 12 - Principais parâmetros do solo	46
Quadro 13 - Resumo das vazões para os diferentes cenários	62
Quadro 14 - Largura mínima calculada.....	62
Quadro 15 - Resumo dos resultados para os diferentes cenários	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CU	Ensaio Triaxiais Adensados Não Drenados
EC	Estado de Conservação
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
FS	Fator de Segurança
GEOSLOPE	GeoSlope International Ltda
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NA	Nível de água
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PAE	Plano de Ação Emergencial
PDA	Potencial de Dano Ambiental
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança da Barragem
SEEP/W	Módulo de Análise de Fluxo de Água do GeoStudio
SLOPE/W	Módulo de Análise de Estabilidade de Taludes do GeoStudio
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO.....	15
1.2 ESTRUTURA	16
2 REVISÃO TEÓRICA.....	17
2.1 BARRAGENS DE TERRA	17
2.2 MODOS DE FALHAS	18
2.3 DRENAGEM INTERNA.....	20
2.4 LOCAL DE IMPLEMENTAÇÃO DA BARRAGEM	22
2.4.1 FINALIDADE	23
2.4.2 GEOLOGIA REGIONAL	23
2.4.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E METEOROLÓGICAS.....	24
2.4.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	26
2.5 CLASSIFICAÇÃO CONFORME DECRETO ESTADUAL Nº 48.140/2021	27
2.6 COMPACTAÇÃO	34
2.7 ANÁLISE DE FLUXO	34
2.8 ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	35
2.9 PROGAMA ANÁLISE DE ESTABILIDADE E FLUXO	36
2.10 FATOR DE SEGURANÇA	37
3 METODOLOGIA	39
3.1 DIMENSIONAMENTO DO FILTRO	39
3.1.1 DIMENSIONAMENTO DE FILTRO VERTICAL.....	39
3.1.2 DIMENSIONAMENTO DE DRENO HORIZONTAL.....	40
3.1.3 DIMENSIONAMENTO DE FAIXA DE FILTRO.....	41
3.2 DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS BASE E ESTUDOS GERAIS DO PROJETO ...	43
3.3 ANÁLISE DE FLUXO	46
3.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	47
3.5 CENÁRIOS ANALISADOS	48
4 RESULTADOS E ANÁLISES	50
4.1 BARRAGEM SEM SISTEMA DE DRENAGEM	50
4.1.1 ENERGIA NORMAL	50
4.2 DRENO HORIZONTAL.....	53

4.1.1 ENERGIA NORMAL	53
4.3 FILTRO CHAMINÉ COM DRENO HORIZONTAL	56
4.1.1 ENERGIA NORMAL	56
4.4 VAZÕES PARA DIMENSIONAMENTO DO DRENO	60
5 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Barragens, estruturas desenvolvidas ao longo da história, desempenharam um papel crucial na agricultura e pecuária, facilitando o desenvolvimento das civilizações com suas variadas formas e tamanhos (ANA, 2021).

Segundo a Lei 12.334 (Brasil, 2010, n.p.), que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, alterada pela Lei nº 14.066 (Brasil, 2020, n.p.), uma barragem refere-se a “qualquer construção localizada dentro ou nas proximidades de corpos d’água permanentes ou temporários, em vales naturais ou em cavidades escavadas com um dique, com o propósito de reter ou acumular líquidos ou misturas de líquidos e sólidos”.

Adicionalmente, uma barragem de pequeno porte é geralmente definida com base em sua altura máxima e capacidade de armazenamento. Esses critérios podem variar de acordo com as regulamentações e práticas de cada país ou região. No entanto, geralmente uma barragem pequena tem uma altura relativamente baixa e uma capacidade de armazenamento limitada em comparação com grandes barragens. Essas barragens são frequentemente projetadas para atender às necessidades locais de irrigação, abastecimento de água, controle de cheias ou geração de energia em comunidades menores. Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA, 2016), se enquadram nesta definição aquelas estruturas de altura inferior a 15 m e com um volume do reservatório de até $3 \times 10^6 \text{ m}^3$.

As barragens podem ser distribuídas em diversas categorias, que se distinguem pelo método de construção empregado e pelos materiais utilizados, podendo incluir barragens de concreto tipo gravidade, barragens de concreto estrutural, barragens em arco de dupla curvatura, barragens de terra homogênea, barragens de terra-enrocamento, barragens de enrocamento com membrana de concreto e barragens em aterro hidráulico (Massad, 2010).

Entre os principais elementos das barragens de terra, destacam-se o núcleo impermeável, responsável por limitar a percolação de água; os filtros e drenos, que controlam o fluxo interno e previnem erosões; e os taludes de montante e jusante, que proporcionam estabilidade estrutural. Além disso, o vertedouro desempenha um papel fundamental no controle do nível

do reservatório, evitando galgamentos, enquanto a fundação sustenta todo o peso da barragem, devendo ser cuidadosamente projetada para suportar as cargas e minimizar deformações. A integração desses componentes, considerando as características geotécnicas e hidrológicas locais, é essencial para o desempenho seguro da barragem ao longo de sua vida útil (Guimarães, 2019).

A drenagem interna tem como finalidade regular o nível do lençol freático ou prevenir o aparecimento de surgências de água provenientes do reservatório em pontos vulneráveis do talude a jusante. Neste contexto, entre os potenciais modos de falha de uma barragem de terra, três casos específicos se destacam devido à influência da água: *piping*, galgamento (*overtopping*) e liquefação. A falha por *piping* que será mais ocasionalmente elaborada devido ao cunho deste estudo, ocorre quando há erosão progressiva de jusante para montante, criando um canal e transportando partículas do solo através do corpo da barragem, devido ao fluxo descontrolado de água de montante para jusante (Ladeira, 2007). A liquefação do solo é um processo em que o solo perde temporariamente sua resistência ou rigidez, podendo resultar em falhas significativas (Rutledge; Been, 2016).

Considerando este contexto, é evidente que uma composição e dimensionamento adequados da drenagem interna são cruciais para assegurar não apenas o funcionamento eficiente, mas também a segurança a longo prazo da estrutura da barragem. Portanto, torna-se imperativo investigar e determinar o melhor sistema de drenagem, levando em consideração os parâmetros específicos definidos para este modelo de barragem.

O mercado e a literatura oferecem uma ampla variedade de tipos, modelos e técnicas de drenagem interna, o que ressalta ainda mais a importância de uma análise criteriosa para selecionar a abordagem mais adequada. A escolha do sistema de drenagem ideal não apenas garantirá a estabilidade hidráulica e estrutural da barragem, mas também contribuirá significativamente para a sua longevidade e eficiência operacional ao longo do tempo.

1.1 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é verificar a influência do sistema de drenagem e da energia de compactação na estabilidade de uma barragem de solo homogêneo de pequeno porte

comparando o desempenho de alguns modelos de drenagem interna, variando também a energia de compactação utilizada, a fim de analisar as diferentes configurações resultantes para a seção tipo, considerando aspectos como eficiência no ganho de estabilidade e a segurança estrutural das barragens.

Como objetivos secundários, tem-se: definir as propriedades do solo, incluindo os parâmetros de resistência, permeabilidade e compactação, e selecionar os sistemas de drenagem a serem testados.

1.2 ESTRUTURA

O presente trabalho de conclusão de curso está dividido em cinco capítulos, incluindo este introdutório.

No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica abrangente, explorando os principais conceitos relacionados a barragens, modos de falhas, drenagem interna, local de implementação da barragem e análise de estabilidade.

No Capítulo 3, é detalhada a metodologia adotada para o estudo, incluindo a descrição dos procedimentos de modelagem da barragem e a seleção dos modelos de drenagem interna a serem analisados. Além disso, são delineados os critérios para a análise de estabilidade e o método utilizado para comparar os resultados obtidos.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e discussão dos resultados obtidos nas análises de estabilidade, com foco na comparação entre os diferentes modelos de drenagem interna, em termos de volume de material. Os resultados são interpretados em relação aos objetivos propostos, destacando as implicações para o projeto da barragem.

Por fim, o Capítulo 5 encerra o trabalho, apresentando as considerações principais derivadas dos resultados encontrados, sendo discutidas as contribuições do estudo para a área de engenharia de barragens, juntamente com quaisquer limitações identificadas e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 BARRAGENS DE TERRA

As barragens de terra são estruturas amplamente utilizadas para a contenção de água e rejeitos, caracterizadas por serem construídas predominantemente com solos compactados. Sua popularidade deve-se à disponibilidade dos materiais e à adaptabilidade a diversos terrenos (Mariano; Silva, 2022).

Para barragens de água, geralmente utiliza-se o alteamento único (Figura 1), onde o dique é construído de uma só vez até a altura final projetada. A seleção do método adequado deve considerar fatores como geologia local, disponibilidade de materiais e análises de estabilidade (Mariano; Silva, 2022).

Figura 1 - Configuração de Barragem construída em etapa única



Fonte: O autor (2025)

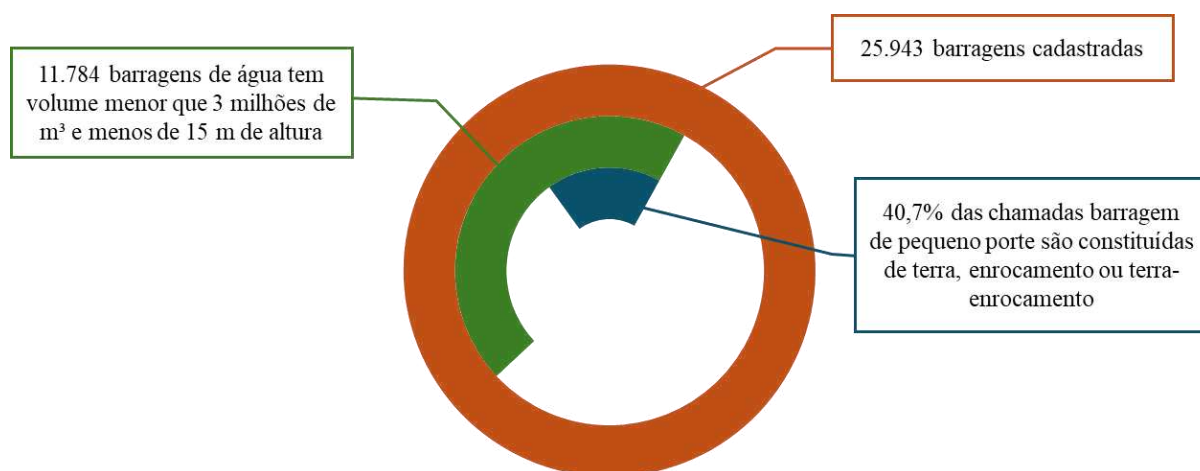
De acordo com a Lei nº 12.334 (Brasil, 2010), cabe ao empreendedor cadastrar e manter atualizadas as informações relativas à barragem no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). O Quadro 1 apresenta as quantidades de barragens de água cadastradas nas diferentes categorias, sendo o total de aproximadamente 26 mil barragens. Da Figura 2, verifica-se que mais de 45% são de pequeno porte e mais de 40% delas são de terra. Esse cadastro é continuamente atualizado, por isso, destaca-se que os valores apresentados a seguir são referentes aos dados baixados no dia 01/07/2024.

Quadro 1 - Distribuição de barragens por função no Brasil

Uso principal	Quantidade	
Irrigação	9.615	37%
Dessedentação Animal	5.433	21%
Regularização de vazão	2.846	11%
Abastecimento humano	2.017	8%
Aquicultura	1.813	7%
Hidroelétrica	1.303	5%
Recreação	631	2%
Contenção de rejeitos de mineração	613	2%
Industrial	596	2%
Paisagismo	526	2%
Contenção de sedimentos de mineração	318	1%
Proteção do meio ambiente	70	0%
Contenção de resíduos industriais	53	0%
Combate às secas	53	0%
Defesa contra inundações	43	0%
Contenção de Sedimentos	11	0%
Navegação	2	0%
Total Geral	25.943	100%

Fonte: Adaptado de SNISB (2023)

Figura 2 - Classificação das barragens cadastradas no SNISB por porte e material de construção



Fonte: Adaptado de SNISB (2023)

2.2 MODOS DE FALHAS

Segundo Matos (2023), diversas são as implicações negativas que o ambiente, a ação antrópica e a falta de monitoramento adequado podem causar no que diz respeito à ruptura de barragens. Aguiar (2014) afirma que muitos dos acidentes ocorridos no território nacional permanecem sem esclarecimentos, o que prejudica o avanço dos estudos na área.

Os principais modos de falha em barragens de terra associados a drenagem interna, são:

Erosão Interna (*Piping*): Ocorre quando a água percola através do solo, criando um canal de escoamento preferencial, um fenômeno chamado de erosão regressiva, no qual a água transporta as partículas. E esse canal tende a aumentar progressivamente seu diâmetro à medida que a água avança pelo solo compactado, resultando, eventualmente, no colapso da estrutura (Ladeira, 2007).

Liquefação: Ocorre pela redução da resistência associada à deformação em solos não coesivos, saturados e com comportamento de contração, ocorrendo durante o cisalhamento em condições não drenadas. Esse fenômeno surge devido à tendência do solo de alterar seu volume ao ser cisalhado, o que resulta em variações nas pressões intersticiais durante o carregamento não drenado (Freire Neto, 2009). Consequentemente, o solo perde sua resistência ao cisalhamento e passa a se comportar como um líquido viscoso.

A identificação e compreensão dos modos de falha são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento e manutenção preventiva. A aplicação de técnicas como a Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA) permite avaliar os riscos associados a cada potencial falha, auxiliando na priorização de ações corretivas e na alocação eficiente de recursos para a segurança da barragem (Fonseca, 2018).

A segurança de barragens de terra depende de uma compreensão aprofundada dos diversos modos de falha e da implementação de medidas preventivas adequadas. O monitoramento contínuo, aliado a análises de risco e manutenção regular, é essencial para garantir a integridade dessas estruturas e a proteção das comunidades a jusante.

2.3 DRENAGEM INTERNA

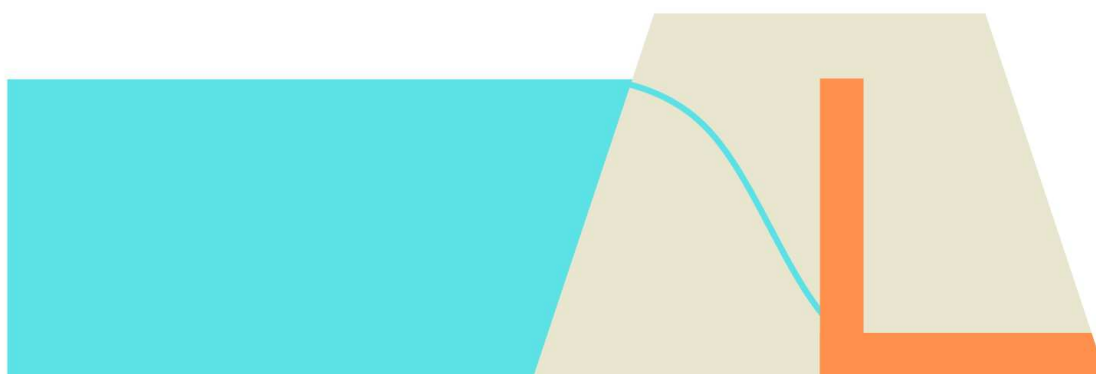
A drenagem interna em barragens de terra é fundamental para garantir a estabilidade e a segurança da estrutura, pois controla a percolação da água através do maciço, reduzindo pressões internas e prevenindo fenômenos como o *piping* e a liquefação (Petrocelli, 2019).

A presença de um sistema de drenagem eficiente minimiza a saturação dos taludes, especialmente o de jusante, mantendo a resistência ao cisalhamento do solo e evitando instabilidades. Além disso, a drenagem interna adequada impede o acúmulo de poropressões que poderiam comprometer a integridade da barragem (Petrocelli, 2019).

A partir da evolução dos sistemas de drenagem apresentada por Massad (2010), pode-se dizer que existem três tipos de sistemas internos de drenagem, que são: dreno de pé; dreno horizontal e filtro chaminé (vertical ou inclinado).

O Filtro Chaminé: é um filtro disposto verticalmente (Figura 3), ou com inclinação no interior da barragem, cuja função é captar a água percolada e evitar o arraste de partículas finas para o interior do sistema de drenagem. Segundo a Eletrobrás (2003), o topo desse filtro deve estar na mesma cota do nível d'água máximo do reservatório para garantir seu bom desempenho.

Figura 3 - Representação do filtro vertical

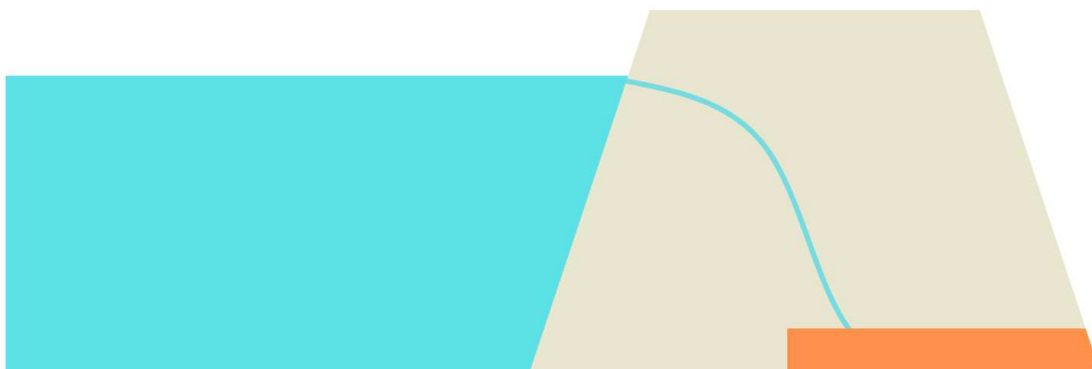


Fonte: Adaptado de Mendes (2017)

O Dreno Horizontal (Tapete Drenante): é um dreno instalado horizontalmente na base da barragem (Figura 4), que geralmente atua em conjunto com o filtro vertical ou inclinado,

ajudando a conduzir a água percolada até o dreno de pé. Sua presença reduz a área saturada do maciço e evita fluxos não direcionados no pé do filtro vertical ou inclinado (Eletrobrás, 2003).

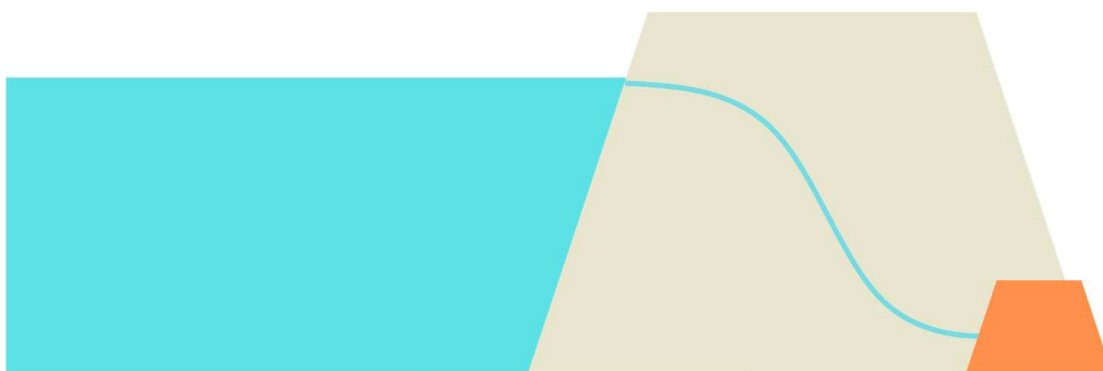
Figura 4 - Representação do dreno horizontal



Fonte: Adaptado de Mendes (2017)

O Dreno de Pé: Também chamado de dreno de saída (Figura 5), é o componente que coleta a água dos filtros verticais/inclinados e horizontais, conduzindo-a para fora da barragem. Ele é utilizado para garantir o escoamento seguro da água captada internamente pelo sistema de drenagem (Silva, 2016).

Figura 5 - Representação do dreno de pé



Fonte: Adaptado de Mendes (2017)

Além das diferentes tipologias de filtros, é possível adotar variações e combinações entre eles, de acordo com as necessidades hidráulicas e geotécnicas da barragem. Por exemplo, o filtro vertical pode ser inclinado para jusante, favorecendo o alongamento do caminho de percolação em fundações mais permeáveis; inclinado para montante, melhorando a estabilidade do talude

nesse trecho em situações de rebaixamento rápido do nível do reservatório; ou ainda em formato misto, unindo ambas as inclinações em um único sistema, com o objetivo de combinar os benefícios hidráulicos e estruturais de cada configuração.

O dimensionamento dos filtros e drenos internos deve atender a critérios de retenção e permeabilidade, garantindo que partículas finas do solo não sejam carregadas pelo fluxo de água, o que poderia levar à erosão interna. Critérios clássicos, como os de Terzaghi e Peck (1962), continuam frequentemente utilizados para definir as granulometrias adequadas dos materiais filtrantes.

Falhas em barragens de terra evidenciam a importância de sistemas de drenagem interna bem projetados e mantidos. Um exemplo relevante é o rompimento da barragem de Teton, ocorrido em 1976 nos Estados Unidos, devido a falha no sistema de controle de percolação. A ruptura por *piping* na fundação, próxima a uma das ombreiras, evoluiu rapidamente, levando ao colapso total em cerca de cinco horas após os primeiros sinais de falha (Oliveira, 2012).

2.4 LOCAL DE IMPLEMENTAÇÃO DA BARRAGEM

A concepção de barragem de terra homogênea envolve a modelagem considerando parâmetros geológicos, hidrogeológicos e meteorológicos típicos da região em que está inserida. São levados em conta os dados das propriedades físicas do material que constituirá o aterro do maciço, os quais são essenciais para a realização do projeto.

Os critérios e premissas do projeto devem rigorosamente ser estabelecidos de acordo com a legislação vigente aplicável, bem como adotar as boas práticas identificadas na bibliografia pertinente. Isso garante a implementação de todas as medidas de segurança necessárias para o empreendimento.

Em um projeto de barragem devem ser analisados a finalidade da barragem, a geologia do local da região, as condições climáticas e meteorológicas, as condições de uso e ocupação do solo no local de implementação.

A seguir, estão descritas as informações relacionadas à região do município de Juiz de Fora escolhida para o presente estudo.

2.4.1 FINALIDADE

A barragem tem como finalidade a acumulação de água por meio da interceptação de um pequeno afloramento d'água, localizado em uma área de fundo de vale. A estrutura tem como objetivo o armazenamento controlado de água para atender a necessidades específicas, como irrigação, controle de vazões ou abastecimento de água, conforme o caso. A barragem visa regular o fluxo hídrico, permitindo a retenção de volumes de água durante períodos de escassez e contribuindo para a estabilidade das condições hidrológicas locais.

2.4.2 GEOLOGIA REGIONAL

Segundo Santos, Souza Júnior e Santos (2022), o município de Juiz de Fora está inserido no contexto geomorfológico da Mantiqueira Setentrional, mais especificamente na unidade denominada Serranias da Zona da Mata Mineira. Essa unidade apresenta formas de relevo alongadas, como cristas e linhas de cumeada, que seguem padrões estruturais condicionados por falhas geológicas pré-existentes. É comum a presença de escarpas associadas a essas falhas, além de sulcos estruturais, cristas simétricas e linhas de cumeada alinhadas, que evidenciam a direção predominante de dobras e falhamentos na região (Gatto *et al.*, 1983).

Sob o ponto de vista geotectônico, Juiz de Fora situa-se no segmento setentrional da Faixa Ribeira, uma das principais unidades estruturais do sudeste do Brasil, formada durante o Ciclo Brasileiro. A geologia da região é marcada por significativa diversidade litológica, com destaque para as seguintes unidades e complexos:

Unidade Andrelândia, com rochas neoproterozoicas, como gnaisses pelíticos e gnaisses bandados com intercalações de quartzitos (Tupinambá *et al.*, 2007);

Complexo Juiz de Fora, constituído por ortogranulitos de composição enderbítica a charnockítica, além de ocorrências subordinadas de rochas gabróicas (André, Valadares e Duarte, 2009);

Complexo Paraíba do Sul, que abriga granitoides formados no contexto orogenético brasileiro (Eirado, Heilbron e Almeida, 2006);

Complexo Piedade, com predominância de gnaisses (Silva *et al.*, 2002).

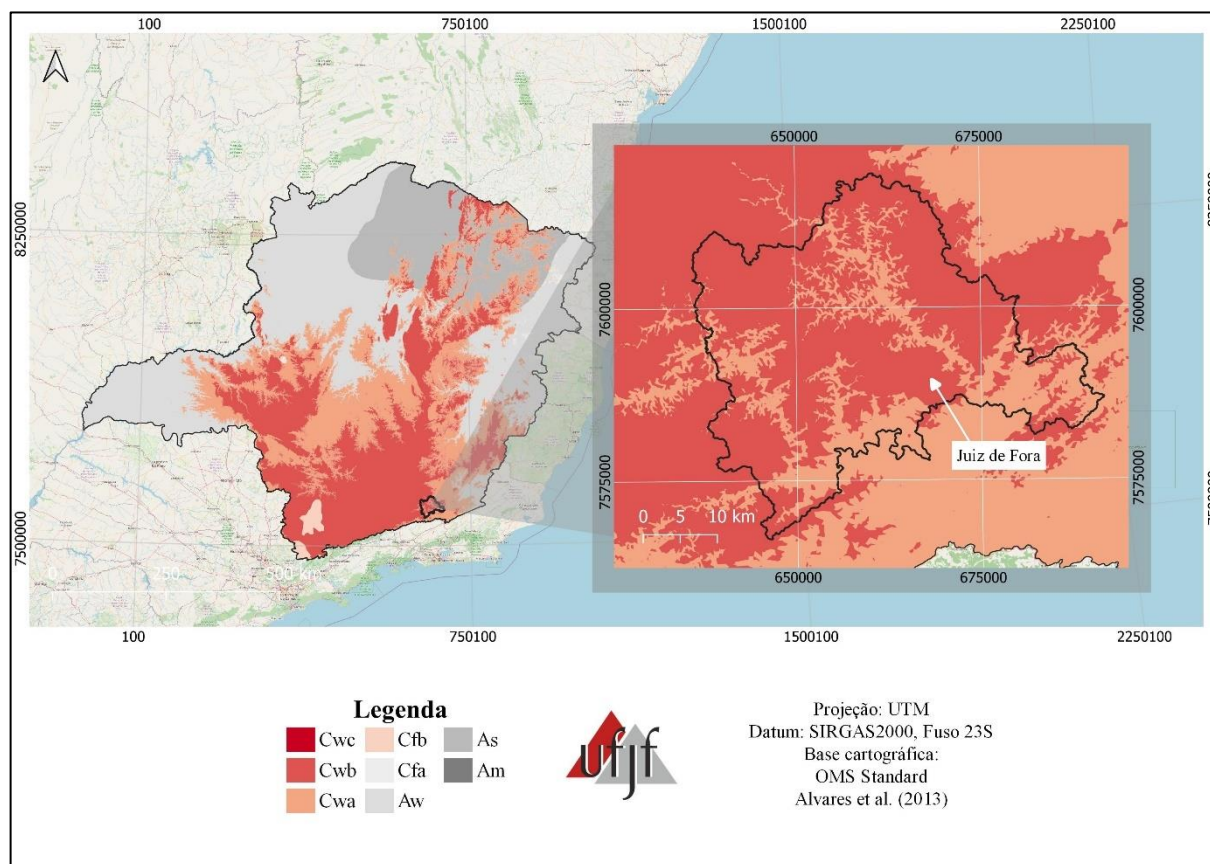
Essa constituição geológica expressa uma história tectônica e metamórfica de grande relevância, relacionada a processos de colisão continental que culminaram na formação do supercontinente Gondwana, há cerca de 500 milhões de anos. Posteriormente, a região também registrou eventos associados à fragmentação da Pangeia e à consequente abertura do oceano Atlântico, por volta de 150 milhões de anos (Hasui, 2010).

2.4.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E METEOROLÓGICAS

Conforme dados disponibilizados por Alvares *et al.* (2013), o município de Juiz de Fora - MG, onde será implantada o objeto de estudo, possui dois tipos de clima, “Cwa”, caracterizado como clima temperado úmido com inverno seco e verão quente, e “Cwb”, caracterizado como um clima temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente, segundo a classificação climática de Köppen e Geiger de 1930.

Alvares *et al.* (2013) realizaram estudo de classificação climática para todo o Brasil que culminou na produção de mapa com 100 m de resolução espacial e planilha de dados climáticos por município. Para elaboração do mapa, os autores construíram um modelo realístico espacialmente distribuído com base em dados de altitude, latitude e longitude, temperatura e precipitação, sendo considerado o verão nos 6 meses mais quentes (outubro a março). Segundo esses, as classes climáticas de Köppen são definidas com base em precipitação e sua distribuição, e temperatura e sua variabilidade sazonal. Desse modo, as variáveis climáticas de interesse para cada pixel classificado foram estimadas a partir de dados de precipitação de 2.950 estações climáticas e de temperatura de 2.400 estações, todas com mais de 25 anos de dados entre 1950 e 1990, obtidos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), DNOCS (Departamento Nacional de Obras de Combate as Secas) e FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). A Figura 6 apresenta a tipologia de clima na região do município de Juiz de Fora.

Figura 6 - Zonas de Koppen para o município de Juiz de Fora

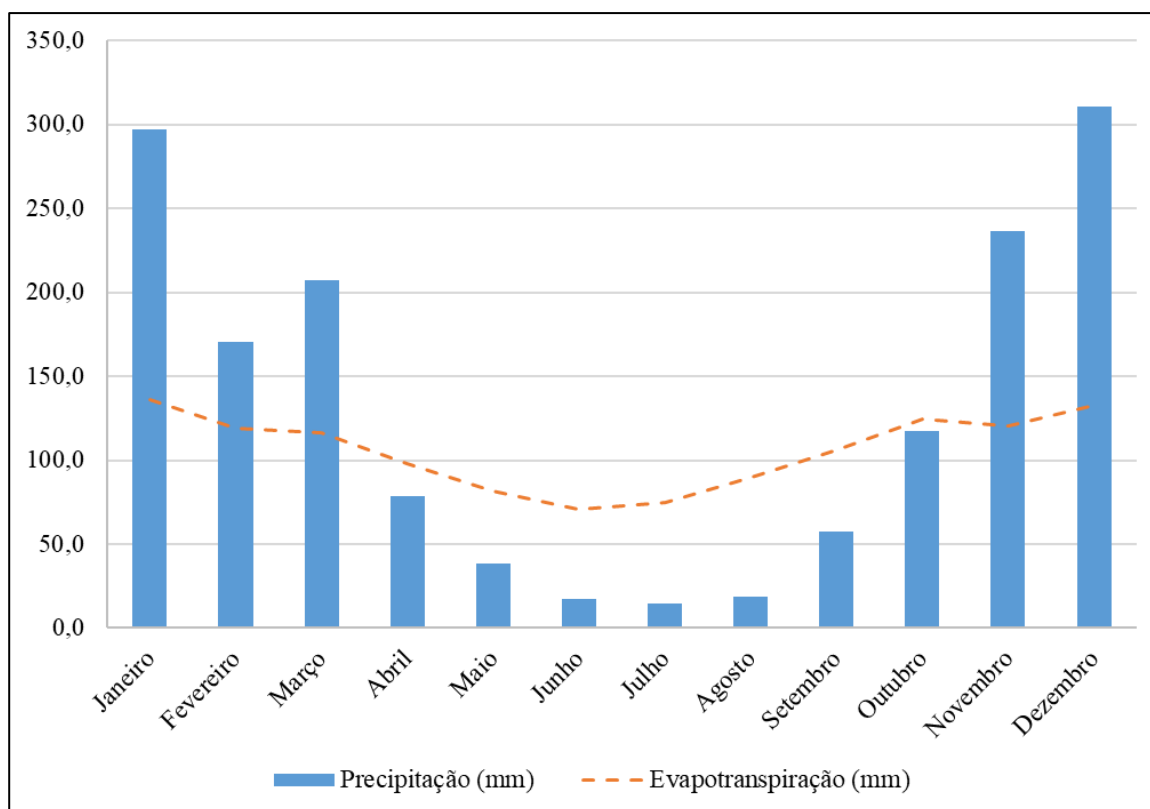


Fonte: Adaptado de Alves *et al.* (2013)

Em relação aos dados climáticos para a região de Juiz de Fora – MG, os dados da normal climatológica (1991 a 2020) disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação climática 83692– Juiz de Fora, indicam para a região as temperaturas máxima, média e mínima anual de 25,0°C, 19,4°C e 15,6°C, respectivamente. A precipitação média anual acumulada é de 1.564,8 mm, com destaque para os meses de janeiro, novembro e dezembro, com médias acumuladas de 297,4 mm, 236,2 mm e 310,4 mm, respectivamente. De forma oposta, os meses de junho a agosto destacam-se como os de menor precipitação acumulada média, não atingindo 20 mm. Essas informações, atreladas aos dados da média de dias sem chuva, caracterizam os meses de abril a outubro como os de menor pluviosidade. A média anual de dias sem chuvas é de 261. A evapotranspiração potencial anual, estimada pela equação de Thornthwaite, é de 1.271,8 mm. Em relação à intensidade do vento, medida a 10 m de altura, a média anual é de 2,7 m/s.

Os gráficos que representam os índices das variáveis supracitadas de acordo com a normal climatológica (1991 a 2020) para a estação climática 83692 – Juiz de Fora, estão apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Precipitação e Evapotranspiração média para o município de Juiz de Fora



Fonte: INMET

2.4.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O uso e a ocupação do solo são fatores determinantes no comportamento hidrológico de uma bacia, especialmente em projetos de barragens. A modificação do solo por atividades antrópicas altera parâmetros como o coeficiente de escoamento (CN), o qual reflete a capacidade do solo em infiltrar água. Segundo Pizarro *et al.* (2006), áreas urbanizadas possuem valores de CN elevados devido à impermeabilização do solo, o que resulta em maior escoamento superficial e aumenta os riscos de sobrecarga em reservatórios e estruturas hidráulicas. Ademais, Beven (2012) destaca que a variabilidade espacial e temporal do uso do solo deve ser cuidadosamente considerada em análises hidrológicas, pois essas mudanças podem afetar tanto a recarga dos aquíferos quanto a frequência e a intensidade de eventos extremos. Esses aspectos são críticos para o dimensionamento adequado das barragens e para garantir sua segurança operacional.

2.5 CLASSIFICAÇÃO CONFORME DECRETO ESTADUAL Nº 48.140/2021

A classificação de barragens que não se enquadram no PNSB e que estão inseridas no estado de Minas Gerais, devem atender aos critérios estabelecidos pelo Decreto da Fundação Estadual de Meio Ambiente nº 48.140 (FEAM, 2021), regulamentador dos dispositivos da Lei nº 23.291 (Minas Gerais, 2019), que instituiu a Política Estadual de Segurança de Barragens - PESB.

Segundo o Art. 4º do Decreto 48.140 (Minas Gerais, 2021) a PESB (Política Estadual de Segurança de Barragens) aplica-se a barragens destinadas à acumulação ou à disposição final ou temporária de rejeitos e resíduos industriais ou de mineração e a barragens de água ou líquidos associados a processos industriais ou de mineração, que apresentem, no mínimo, uma das características a seguir:

- I – Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 10 m (dez metros);
- II – Capacidade total do reservatório maior ou igual a 1.000.000 m³ (um milhão de metros cúbicos);
- III – Reservatório com resíduos perigosos;
- IV – Potencial de Dano Ambiental médio ou alto, conforme disposto neste decreto.

De acordo com o Decreto Estadual nº 48.140 (Minas Gerais, 2021) as barragens são classificadas a partir das informações prestadas pelo empreendedor por Categoria de Risco (CRI) e por Potencial de Dano Ambiental (PDA).

A classificação por Categoria de Risco em alto, médio ou baixo deve ser realizada em função das características e dos aspectos da própria barragem que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente ou desastre e a classificação por categoria de Potencial de Dano Ambiental da barragem em alto, médio ou baixo deve ser realizada em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (Minas Gerais, 2021).

O Quadro 2, envolve aspectos construtivos e estruturais que podem influenciar no risco de falhas devido ao desgaste ao longo do tempo, na probabilidade de ocorrência e a sua escala caso ocorra.

Quadro 2 - Características Técnicas (CT)

Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)	Método Construtivo (d)	Auscultação (e)
Altura $\leq 10\text{m}$ (0)	Comprimento $\leq 50\text{m}$ (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0)	Etapa única (1)	Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico (0)
$10\text{m} < \text{Altura} < 30\text{m}$ (1)	$50\text{m} < \text{Comprimento} < 200\text{m}$ (1)	Milenar (2)	Alteamento a jusante (2)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto, porém em processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (2)
$30\text{m} \leq \text{Altura} \leq 60\text{m}$ (4)	$200 \leq \text{Comprimento} \leq 600\text{m}$ (2)	TR = 500 anos (5)	Alteamento por linha de centro (5)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto sem processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (6)
Altura $> 60\text{m}$ (7)	Comprimento $> 600\text{m}$ (3)	TR Inferior a 500 anos ou desconhecida/ Estudo não confiável (10)	Alteamento a montante ou desconhecido ou que já tenha sido alteado a montante ao longo do ciclo de vida da estrutura (10)	Barragem não instrumentada em desacordo com o projeto (8)

Fonte: FEAM (2021)

O Quadro 3 analisa as condições atuais da barragem e os principais indícios de deterioração. São verificadas a presença de fissuras ou trincas, que podem indicar falhas estruturais; a corrosão ou deterioração dos materiais; o funcionamento dos equipamentos de controle, como válvulas, comportas e/ou extravasores, que são essenciais para a operação segura da barragem; e a vegetação indesejada, que pode comprometer a integridade da estrutura.

Quadro 3 - Estado de Conservação (EC)

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (f)	Percolação (g)	Deformações e Recalques (h)	Deterioração de Taludes/Paramentos (i)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal / barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferrugem exposta, presença de vegetação arbórea, se implantação das medidas corretivas necessárias. (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)

Fonte: FEAM (2021)

O Quadro 4 verifica se há um conjunto de procedimentos e diretrizes para garantir a operação segura da barragem. A existência de procedimentos de monitoramento, como inspeções regulares, é um dos aspectos avaliados. Além disso, são analisados os planos de ação de emergência, que devem conter estratégias claras para responder a incidentes ou falhas. A capacitação das equipes responsáveis pela operação e manutenção também é considerada, assim como os protocolos de comunicação com autoridades e comunidades para garantir uma resposta rápida em caso de necessidade. Um PSB bem estruturado reduz significativamente os riscos associados à barragem.

Quadro 4 - Plano de Segurança da Barragem (PSB)

Documentação de Projeto (j)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (k)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (l)	Plano de Ação Emergencial - PAE (Quando exigido pelo órgão fiscalizador) (m)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (n)
Projeto executivo e “como construído” (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Auditoria de Segurança (0)
Projeto executivo ou “como construído” (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas Relatórios de Auditoria de Segurança (2)
Projeto “como está” (3)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de Procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e Monitoramento (4)
Projeto básico (5)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)
Projeto conceitual (8)	-	-	-	Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Auditoria de Segurança (8)
Não há documentação de projeto (10)	-	-	-	-

Fonte: FEAM (2021)

O Quadro 5 classifica a barragem com base nos impactos ambientais que um rompimento poderia causar. São considerados fatores como a extensão da área potencialmente afetada, indicando o alcance dos danos em caso de falha; a sensibilidade ambiental da região, levando em conta a presença de áreas de preservação, biodiversidade e espécies ameaçadas; e os usos da água abaixo da barragem, como abastecimento público, irrigação e atividades recreativas. O PDA é essencial para definir estratégias de mitigação de impactos ambientais e orientar ações preventivas.

Quadro 5 - Potencial de Dano Ambiental (PDA)

Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
MUITO PEQUENO ≤ 1 milhão m ³ (1)	INEXISTENTE (Não existem pessoas permanentes /residentes ou temporárias / transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	INEXISTENTE (Não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
PEQUENO 1 milhão a 5 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	BAIXO (Existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
MÉDIO 5 milhões a 25 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	MÉDIO (Existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
GRANDE 25 milhões a 50 milhões m ³ (4)	EXISTENTE (Existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (8)	ALTO (Existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
MUITO GRANDE ≥ 50 milhões m ³ (5)	-	MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I - Perigosos segundo a NBR 10.004 da ABNT) (10)	-

Fonte: FEAM (2021)

Para exemplificar a influência da escolha do sistema de drenagem na classificação de risco, apresentam-se dois cenários: (a) sistema de drenagem interna de operando de maneira eficiente; e, (b) sistema de drenagem interna comprometido ou ineficiente. Para tal, aplica-se os resultados obtidos nos Quadros anteriores (Quadro 2 ao Quadro 5) nas Faixas de classificação da Categoria de Risco e Potencial de Dano Ambiental, Quadro 6 e Quadro 7, respectivamente. Posteriormente, verifica-se a classificação da barragem no Quadro 8.

Quadro 6 - Faixas de classificação da categoria de risco

Faixas de Classificação	Categoria de Risco	CRI
	Alto	≥ 65 ou $EC^* \geq 10$
	Médio	$37 < CRI < 65$
	Baixo	≤ 37

Nota:

(*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTO e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

Fonte: FEAM (2021)

Quadro 7 - Classificação da barragem quanto ao potencial de dano ambiental

Potencial De Dano Ambiental		
Faixas de classificação	Potencial De Dano Ambiental	Pontos
	Alto	≥ 13
	Médio	$7 < DPA < 13$
	Baixo	≤ 7

Fonte: FEAM (2021)

Quadro 8 - Matriz de classificação da barragem

Categoria de Risco	Potencial de Dano Ambiental Barragens		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Medio	B	C	D
Baixo	B	C	E

Fonte: FEAM (2021)

No cenário (a), enquadra-se na Classe E com Categoria de Risco Baixo ($S = 7$) e Potencial de Dano Ambiental Baixo ($S = 2$). No aspecto das Características Técnicas, a barragem obteve uma pontuação total de 7, composta por 1 ponto referente à altura, 5 pontos relacionados à vazão de projeto e 1 ponto relativo ao método construtivo; os itens ligados ao Estado de Conservação receberam pontuação zero, abrangendo a confiabilidade das estruturas extravasoras, percolação, deformações e recalques, além da deterioração dos taludes ou paramentos, sugerindo ausência de problemas ou a inexistência de informações que justifiquem pontos nesses quesitos. Da mesma forma, o Plano de Segurança da Barragem também obteve soma zero, com ausência de pontos em todos os itens analisados, incluindo documentação de projeto, qualificação da equipe de segurança, manuais de procedimentos, plano de ação emergencial (PAE) e relatórios de inspeção e monitoramento. Ressalta-se que, apesar da ausência de pontuação nos aspectos de segurança e conservação, a barragem conta com um sistema de drenagem interna eficiente, o que potencialmente contribui para a estabilidade e a segurança operacional da estrutura.

Para o cenário (b), o objeto de estudo passaria a enquadrar na Classe D com Categoria de Risco Médio ($S = 53$) e Potencial de Dano Ambiental Baixo ($S = 2$). No que se refere às Características Técnicas (CT), a barragem somou 7 pontos, distribuídos entre a altura (1 ponto), vazão de projeto (5 pontos) e método construtivo (1 ponto), sem pontuação nos quesitos de comprimento e auscultação. No Estado de Conservação (EC), a pontuação total foi de 6, atribuída exclusivamente ao item de percolação, que recebeu 6 pontos, indicando um potencial risco associado ao fluxo descontrolado de água através do maciço, possivelmente agravado pela ineficiência ou ausência do sistema de drenagem interna. Os demais aspectos de confiabilidade das estruturas extravasoras, deformações e recalques, e deterioração de taludes ou paramentos não receberam pontuação, sugerindo que não apresentaram anomalias significativas ou não foram avaliados. Por fim, o Plano de Segurança da Barragem (PSB) alcançou uma pontuação elevada de 40, refletindo a existência de documentação de projeto (10 pontos), estrutura organizacional e qualificação da equipe (6 pontos), manuais de procedimentos (8 pontos), plano de ação emergencial (8 pontos) e relatórios de inspeção e monitoramento (8 pontos). Este resultado demonstra que, apesar das fragilidades no sistema de drenagem, a barragem conta com um plano de segurança robusto e bem estruturado, essencial para mitigar riscos e garantir a segurança operacional da estrutura.

Com isso, percebe-se que a ineficiência ou ausência de sistema de drenagem interno pode levar a anomalias e causas raiz de possíveis modos de falha, piorando o Estado de Conservação, consequentemente podendo aumentar a Categoria de Risco para ALTO, uma vez que, a atribuição de pontuação igual a 10 em qualquer um dos parâmetros avaliados no Estado de Conservação (EC) implica, automaticamente, a classificação da barragem na Categoria de Risco Alto. Ademais, estas anomalias podem colocar a estrutura em situação de emergência.

Por fim, as Características Físicas e o Potencial Dano ambiental não são afetados pela drenagem interna, uma vez que são características que dependem de sua geometria e do contexto em que a estrutura se encontra. Entretanto, o Estado de Conservação está diretamente relacionado ao dia a dia da estrutura, logo, em um cenário em que o sistema de drenagem não se comporta de maneira adequada, pode haver consequências.

2.6 COMPACTAÇÃO

A compactação é um processo fundamental na construção de barragens de terra, pois visa reduzir os vazios do solo, aumentando sua densidade. Essa melhoria resulta em maior resistência mecânica e menor permeabilidade do aterro, fatores essenciais para garantir a estabilidade da estrutura (Sousa Pinto, 2002).

Em obras de pequeno porte, a compactação pode ser realizada com equipamentos leves ou até manualmente, mas em aterros maiores são utilizados rolos compactadores adequados ao tipo de solo, como o rolo pé-de-carneiro para solos argilosos e os rolos vibratórios para solos arenosos (Sousa Pinto, 2002; Massad, 2010). O processo ideal de compactação exige conhecimento da curva de compactação do solo, que relaciona a umidade do solo com sua massa específica seca. O ponto de umidade ótima representa a condição em que o solo atinge sua maior densidade e, conseqüentemente, melhor desempenho técnico (Trindade *et al.*, 2003).

O controle é feito com base na umidade ótima e na densidade seca máxima, com tolerâncias especificadas em norma. Quando o solo é compactado fora da umidade ideal, sua permeabilidade pode aumentar significativamente. Por exemplo, para uma umidade 2,5% abaixo da ótima e densidade de 95%, o coeficiente de permeabilidade pode ser até 10 vezes maior do que o valor correspondente à compactação ideal (Sousa Pinto, 2002).

2.7 ANÁLISE DE FLUXO

A análise de fluxo em barragens de terra tem papel fundamental na avaliação do comportamento hidráulico do maciço. Um dos principais objetivos dessa análise é a identificação da linha freática, que separa a região saturada da não saturada dentro do corpo do aterro. A partir dessa delimitação, é possível compreender a distribuição das pressões neutras (poropressões) no interior da estrutura, o que impacta diretamente nas análises de estabilidade.

Para que a análise de fluxo seja precisa, é necessário o conhecimento de alguns parâmetros importantes, como a geometria da barragem, o nível do reservatório, o sistema de drenagem adotado e, principalmente, o coeficiente de permeabilidade do solo utilizado. Esse último é

determinado por meio de ensaios específicos, que podem ser realizados em laboratório ou diretamente no campo (Andrade, 2016).

A permeabilidade é uma característica crucial no projeto de barragens, pois define a facilidade com que a água pode atravessar o solo. Em materiais compactados, essa propriedade está diretamente relacionada ao grau de compactação e à umidade. Quando o solo é compactado próximo da condição ótima, há uma redução no número de vazios, o que limita os caminhos disponíveis para a passagem da água e contribui para a eficiência hidráulica do aterro (Sousa Pinto, 2002).

O sistema de drenagem atua como um elemento auxiliar à segurança da barragem, ao conduzir a água que eventualmente percola pelo maciço, reduzindo a pressão de poros e evitando a saturação excessiva do solo (Andrade, 2016).

2.8 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A análise de estabilidade de taludes em barragens de terra é fundamental para garantir sua segurança.

Essa análise deve ser avaliada considerando as tensões efetivas predominantes, exceto em situações em que o comportamento dos materiais se assemelhe ao das argilas plásticas saturadas ou solos susceptíveis à contração durante o cisalhamento. Nesses casos, a análise deve ser conduzida em termos de tensões totais (ANA, 2016).

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento e poropressão dos materiais envolvidos devem ser obtidos a partir de ensaios laboratoriais que representem, de forma mais precisa possível, as condições reais de carregamento da estrutura (ANA, 2016).

Para garantir a estabilidade contra escorregamentos, os taludes da barragem devem ser analisados sob diferentes condições de carregamento, incluindo: (i) final de construção, (ii) rebaixamento rápido do nível do reservatório, (iii) regime permanente de operação e (iv) ocorrência de eventos sísmicos. Além dessas situações, pode ser necessária a verificação de

outras condições específicas, como escavações próximas à estrutura ou estágios construtivos que envolvam bermas de equilíbrio ainda não executadas (ANA, 2016).

A análise da percolação em regime permanente reflete a condição operacional da barragem, onde o reservatório permanece em nível elevado por um período suficiente para que a saturação do maciço e a estabilização do fluxo de percolação ocorram. A rede de percolação obtida pode ser incorporada às análises de estabilidade, e os parâmetros de resistência ao cisalhamento devem ser determinados por ensaios triaxiais adensados não drenados (CUsat ou Rsat) com medição de poropressões (ANA, 2016).

O rebaixamento acelerado do nível do reservatório pode ocorrer por motivos operacionais ou emergenciais e deve ser considerado no projeto. Para solos de baixa permeabilidade, um rebaixamento gradual pode não permitir uma dissipação significativa das poropressões, sendo tratado, para fins de cálculo, como um rebaixamento rápido (ANA, 2016).

A estabilidade da barragem sob ações sísmicas deve ser avaliada, especialmente em regiões com histórico de atividade sísmica, devido à possibilidade de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório. As análises pseudoestáticas são amplamente recomendadas, e, na ausência de estudos específicos de sismicidade, sugere-se a adoção de acelerações equivalentes a 0,05g na direção horizontal e 0,03g na direção vertical (ANA, 2016).

Essa abordagem garante que os efeitos da carga sísmica sejam considerados no dimensionamento da estrutura, proporcionando segurança adicional à barragem durante eventos dinâmicos inesperados.

2.9 PROGRAMA ANÁLISE DE ESTABILIDADE E FLUXO

O GeoStudio® da GEOSLOPE International Ltda. é um conjunto de ferramentas computacionais amplamente utilizado na engenharia geotécnica para a análise de estabilidade de taludes, fluxo de água em solos, tensões e deformações em maciços terrosos, entre outras aplicações. Dentre os módulos disponíveis no GeoStudio®, dois dos mais relevantes para a análise de estabilidade de barragens são o **SLOPE/W** e o **SEEP/W**.

SLOPE/W: É um módulo voltado para a análise de estabilidade de taludes por meio do método do equilíbrio limite. Ele permite avaliar superfícies potenciais de ruptura e calcular o fator de segurança contra deslizamento para diferentes condições de carregamento, como o final da construção, rebaixamento rápido do reservatório e ações sísmicas.

SEEP/W: Esse módulo realiza a análise do fluxo de água através de solos e materiais porosos, permitindo a modelagem de condições de percolação em regime permanente e transitório. A integração entre **SEEP/W** e **SLOPE/W** possibilita a consideração das poropressões resultantes do fluxo de água ao calcular a estabilidade dos taludes.

A utilização desses módulos em conjunto permite obter uma avaliação mais precisa das condições de segurança de barragens, considerando os efeitos das variações de nível d'água, dissipação de poropressão e resposta do maciço em diferentes cenários operacionais.

2.10 FATOR DE SEGURANÇA

No caso de barragens de terra homogênea, o FS é calculado considerando diversos cenários de carregamento (rebaixamento rápido, final de construção, operação, sismo). Os métodos mais utilizados para essa verificação são o método de equilíbrio limite (Fellenius, Bishop, Janbu), que avaliam a estabilidade global por meio da análise de superfícies potenciais de ruptura (Pereira *et al.*, 2016).

A determinação adequada do FS depende diretamente das propriedades geotécnicas do solo, como coesão, ângulo de atrito interno e peso específico, bem como da geometria da obra e das condições de carregamento. Conforme indicado por Caputo (1988), a escolha do fator de segurança envolve um julgamento de engenharia que considera incertezas nas condições do solo, nas cargas atuantes e na qualidade da execução da obra.

Em barragens de terra, dependendo da classe da obra e do tipo de análise (condições normais, extremas ou sísmicas), esse valor pode variar. O Quadro 9 apresenta os valores mínimos conforme Cruz (1996).

Quadro 9 - Critério de Filtro para Cruz (1996)

Condição de Solicitação	Talude	Seção Homogênea
Final de Construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Regime permanente de operação	Montante	1,5
	Jusante	1,5
Rebaixamento de reservatório N.A. máx. N.A. mín. N.A. máx. Sol. Vertedouro	Montante	1,1
	Jusante	1,0
Qualquer condição para verificação da estabilidade para resistência residual	Montante	1,2
	Jusante	1,2

Fonte: Adaptado de Cruz (1996)

3 METODOLOGIA

3.1 DIMENSIONAMENTO DO FILTRO

A sequência metodológica empregada no dimensionamento do filtro baseou-se em Andrade (2016), que apresenta critérios técnicos voltados à definição das características granulométricas e das camadas do filtro. Essa metodologia adotada para o dimensionamento do filtro, foi desenvolvida com base nas literaturas consolidadas, sendo apoiada nos critérios técnicos estabelecidos por autores como Cruz (1996), Massad (2010) e US Army Corps of Engineers – USACE (1986).

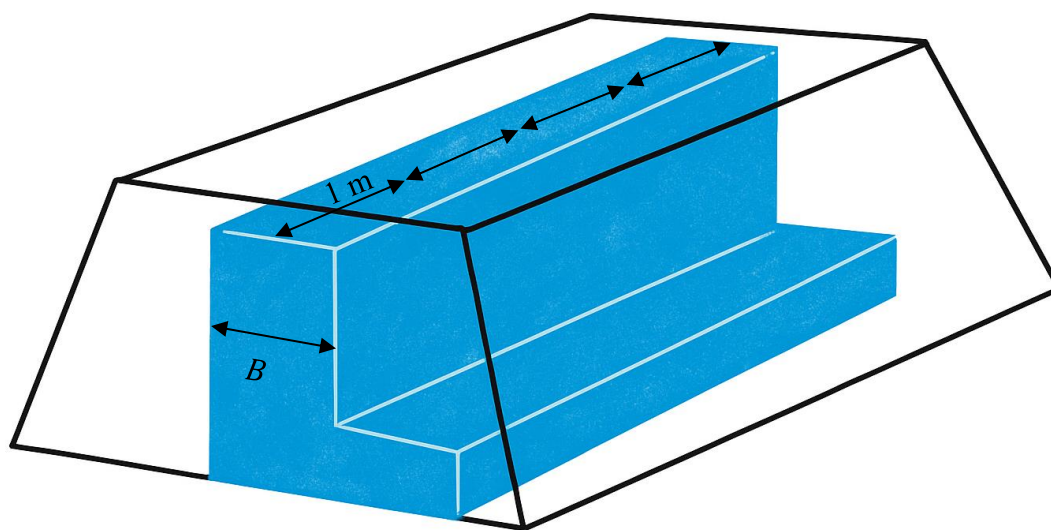
3.1.1 DIMENSIONAMENTO DE FILTRO VERTICAL

O fluxo nos filtros chaminé podem ser considerados majoritariamente vertical, de modo que a perda de carga (Δh) é aproximadamente igual ao comprimento do filtro. Assim, o gradiente hidráulico (i) pode ser assumido como unitário, ou seja, $i \approx 1$ (Equação 1).

$$i = \frac{\Delta h}{l} \approx 1 \quad \text{Equação (1)}$$

Substituindo os valores da Equação 1 na equação da Lei de Darcy, obtém-se a Equação 2, utilizada para o cálculo da vazão no filtro vertical. Nessa equação, a área da seção transversal é representada por B , uma vez que se considera a vazão por metro linear. A vazão por metro linear (Figura 8) refere-se à quantidade de fluido que passa por unidade de comprimento de um sistema, como um dreno ou uma tubulação. O termo k_{fv} corresponde ao coeficiente de permeabilidade do material do filtro.

Figura 8 - Vazão por metro linear



Fonte: O Autor (2025)

$$Q = k_{fv} \cdot l \cdot B \quad \text{Equação (2)}$$

Evidenciando B , obtém-se a Equação 3 para dimensionamento da espessura do filtro.

$$B = \frac{Q}{k_{fv}} \quad \text{Equação (3)}$$

Segundo Cruz (1996), recomenda-se que a largura do filtro vertical seja maior que 0,80 m por razões construtivas.

3.1.2 DIMENSIONAMENTO DE DRENO HORIZONTAL

Para o dreno horizontal pode-se considerar a hipótese de ele trabalhar em carga ou não. Neste estudo optou-se por utilizar o dreno em carga por questão de segurança, visto que é a situação mais desfavorável com variação linear em toda extensão. Dessa forma, o gradiente hidráulico (i) é constante e pode ser obtido pela Equação 4, onde B é a altura do dreno e L o comprimento.

$$i = \frac{B}{L} \quad \text{Equação (4)}$$

A vazão no dreno horizontal será determinada pela Equação 5, onde k_{fh} é o coeficiente de permeabilidade do material do dreno:

$$Q = k_{fh} \cdot \frac{B}{L} \cdot B \quad \text{Equação (5)}$$

Então, a largura do dreno horizontal será obtida através da Equação 6.

$$B = \sqrt{\frac{Q \cdot L}{k_{fh}}} \quad \text{Equação (6)}$$

Massad (2010) aconselha, no dimensionamento de drenos, usar fator de segurança da ordem de 10 para os coeficientes de permeabilidade visto que estes são de difícil estimativa na prática.

3.1.3 DIMENSIONAMENTO DE FAIXA DE FILTRO

O U.S. Army Corps of Engineers também apresenta um Critério de Filtro importante, pois considera a categoria de solo definida de acordo com o percentual passante na peneira N° 200 (0,075 mm) determinado a partir da curva granulométrica do solo da barragem (Quadro 10).

Quadro 10 - Critério de Filtro USACE (1986)

Categoria	Percentual passante na Peneira N° 200 (0,075mm)
1	>85
2	40 – 85
3	15 – 39
4	<15

Fonte: Modificada de USACE (1986), adaptado de Andrade (2016)

De posse da categoria do solo, determina-se o tamanho máximo de D15 para o filtro de acordo com o Quadro 11.

Quadro 11 - Critérios de Filtro segundo USACE (1986)

Categoria do Solo Base	Descrição do Solo Base e percentagem passante na peneira N° 200 (0,075mm) (a)	Critério de Filtro (b)
1	Siltes Finos e Argilas >85%	(c) $D_{15f} \leq 9 \times D_{85s}$
2	Areias, Siltes, Argilas e Areias siltosas e argilosas 40 a 85 %	$D_{15f} \leq 0,7 \text{ mm}$
3	Areias siltosas e argilosas e Pedregulhos 15 a 39 %	(d), (e) $D_{15f} \left[\frac{40 - A}{40 - 15} \right] \cdot [(4 \times D_{85s}) - 0,7\text{mm}] + 0,7\text{mm}$
4	Areias e Pedregulhos <15%	(f) $D_{15f} \leq 4 \text{ ou } 5 \times D_{85s}$

Notas:

- (a) Categoria designada para solos que contém partículas maior que 4,75mm determinada a partir de uma curva granulométrica do solo de base que foi ajustado para 100 % passante na peneira n°4 (4,75mm).
- (b) Os filtros devem ter tamanho máximo de partículas de 75 mm e máximo de 5% passante na peneira n° 200 (0.075mm) com índice de plasticidade (IP) igual a zero. Para assegurar permeabilidade satisfatória, filtros devem ter D_{15f} maior ou igual $4 \times D_{15s}$, mas não ser menor que 0,1mm.
- (c) Quando $9 \times D_{85s}$ for menor que 0,2 mm, usar 0,2 mm.
- (d) A= percentual passante na peneira n° 200 (0.075mm) depois de qualquer reclassificação.
- (e) Quando $4 \times D_{85s}$ for menor que 0,7 mm, usar 0,7 mm.
- (f) Na categoria 4, o critério D_{15f} menor ou igual a $4 \times D_{85s}$ deve ser usado no caso de filtros abaixo do Rip Rap sujeito a ondas e drenos sujeitos a grandes afluências e vibrações.

Fonte: Adaptado de Andrade (2016)

Outra consideração importante é que os valores de D_{15f} e D_{85s} do material coesivo devem ser obtidos através do ensaio de sedimentação sem defloculante e sem agitação.

Por fim, para as características do solo empregado no corpo da barragem, que serão descritos adiante, observa-se que, de acordo com o Critério proposto por USACE (1986), o solo da barragem se enquadra na categoria 2 (40 a 85% passante na peneira N°200) e, por isso, o D_{15} do dreno deve ser inferior ou igual a 0,7 mm. Deste modo, o valor adotado para o coeficiente

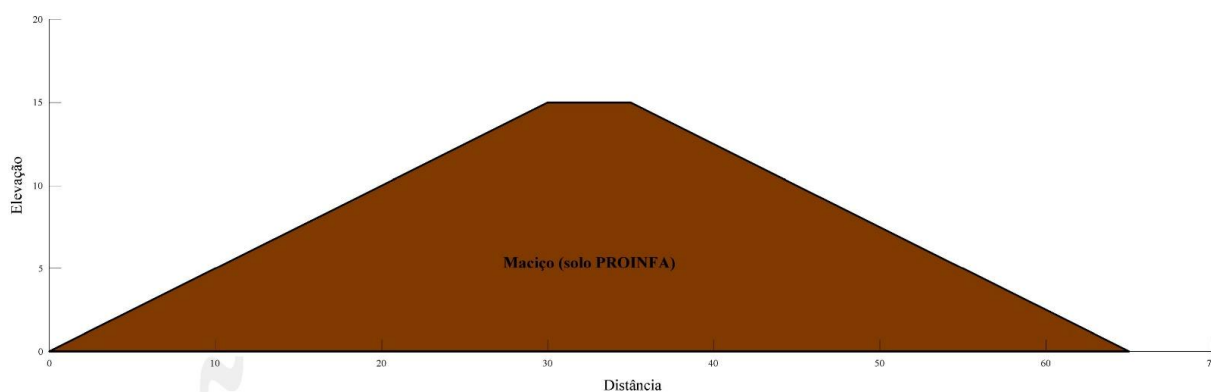
de permeabilidade do filtro foi de 10^{-2} cm/s, que está de acordo com o valor indicado pela literatura para o material do dreno (Andrade, 2016).

3.2 DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS BASE E ESTUDOS GERAIS DO PROJETO

A barragem será implantada no contexto geológico do município de Juiz de Fora, tendo sua fundação assentada sobre rochas metamórficas. No entanto, neste trabalho, não foi realizada a análise da zona de fundação devido à limitação do número de materiais disponíveis no programa utilizado. Dessa forma, para viabilizar a verificação, considerou-se que eventuais falhas no material de fundação foram previamente tratadas e solucionadas no projeto, não havendo, portanto, percolação através da fundação.

Quanto a geometria da barragem, será implantada seguindo a seção típica estabelecida (Figura 9), adotando as recomendações bibliográficas para a estrutura de pequeno porte apresentadas a seguir.

Figura 9 - Seção transversal da barragem



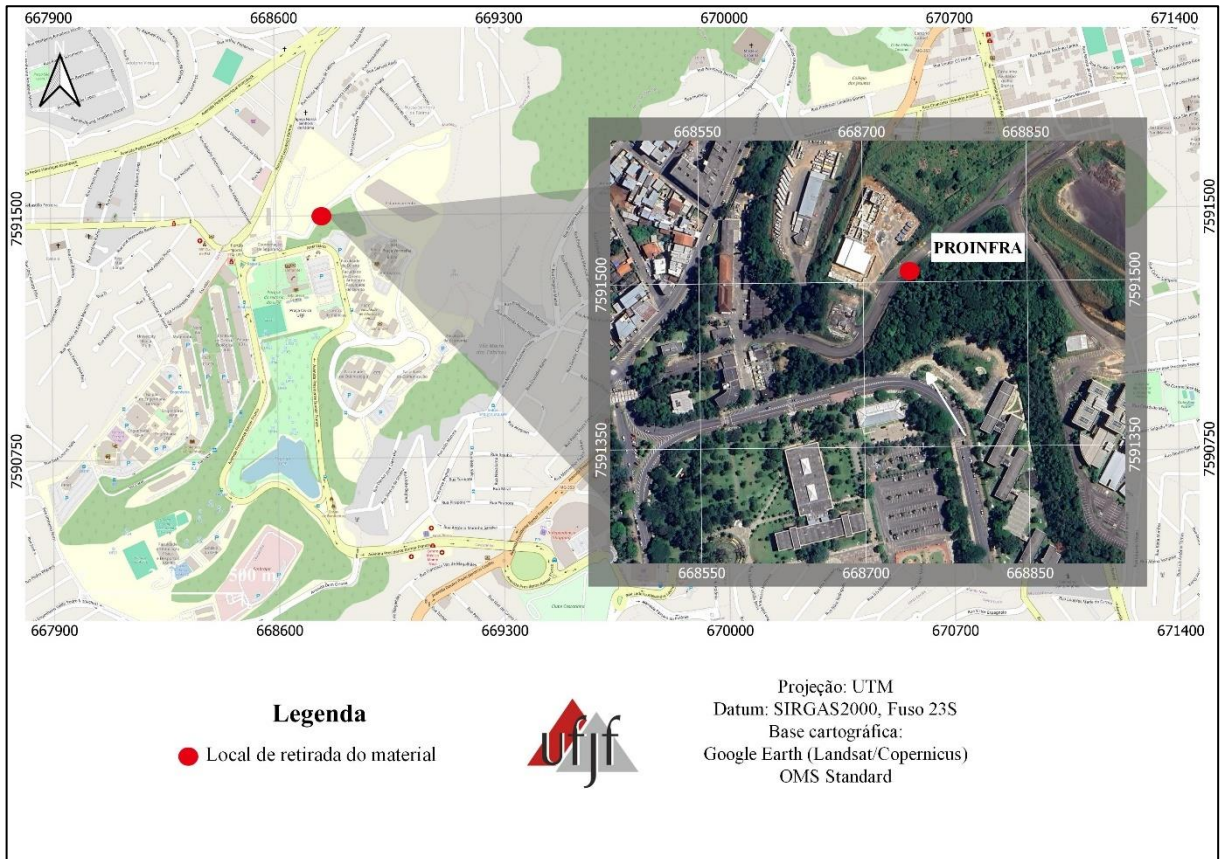
Fonte: O Autor (2025)

Segundo o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragem – Volume V (ANA, 2016), a largura da crista é influenciada por fatores como a importância da obra, risco sísmico, materiais, configuração da linha de saturação, processo construtivo e necessidade de tráfego de veículos. Para o estudo em questão, foi definida uma largura de 5,0 metros devido às dimensões da obra.

Para as inclinações de taludes, que podem ser encontrados tanto nas faces externas quanto internas das barragens, devem ser projetados com base em diversos fatores, como a estabilidade do solo e o tipo de material utilizado. Segundo Cruz (1996), a escolha da inclinação dos taludes varia conforme as características do solo, para solos argilosos compactados, o autor recomenda uma inclinação entre 3:1 e 2:1 para taludes de montante, enquanto para taludes de jusante, a inclinação ideal seria de 2,5:1 a 2:1. Com isso, este estudo será apoiado em taludes com inclinação arbitrada de 2:1 para montante e jusante.

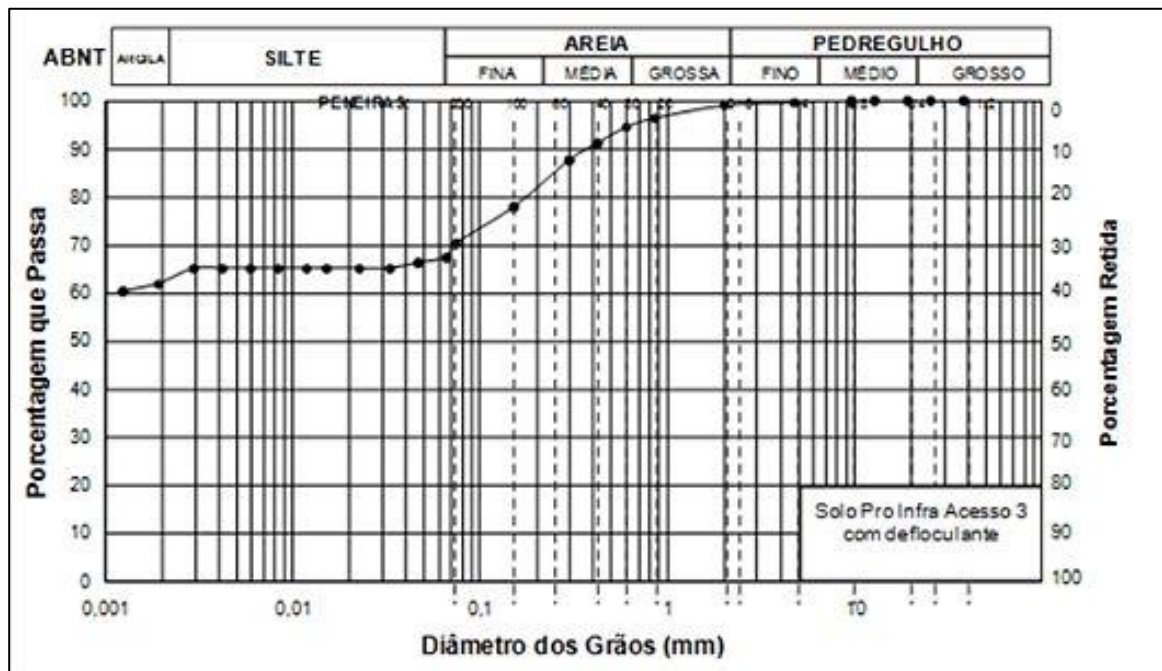
Os parâmetros adotados incluem a massa específica do solo, coeficiente de permeabilidade, granulometria, intercepto coesivo e ângulo de atrito para as energias de compactação normal e intermediária, para o material coletado em um talude nas proximidades da Pró-Reitoria de Infraestrutura (PROINFRA) da Universidade Federal de Juiz de Fora conforme analisado nos trabalhos de Castro e Melo (2020), Queiroz *et al.* (2023) e Marcelino (2023). A Figura 10 e a Figura 11 apresentam o local de coleta da amostra e a curva granulométrica do solo, respectivamente, enquanto o Quadro 12 discretiza os principais parâmetros do solo que são dados de entrada no modelo estudado.

Figura 10 - Local de retirada do solo (PROINFRA)



Fonte: O Autor (2025)

Figura 11 - Curva Granulométrica do solo argiloso



Fonte: Oliveira Júnior (2014)

Quadro 12 - Principais parâmetros do solo

	Massa específica do solo (KN/m ³)	Coef.de permeabilidade (k - cm/s)	Intercepto Coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo na energia normal	20,04	3,83E-03	27,9	32,8
Solo na energia intermediária	20,63	8,42E-06	22,5	38,3

Fonte: O Autor (2025)

3.3 ANÁLISE DE FLUXO

De acordo com o que consta em Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRAS, 2003) e recomendado em Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragem – Volume V (ANA, 2016), a borda livre mínima deve ser de 1,0 m acima do nível de máxima cheia do reservatório em barragens de aterro, todavia essa medida não é prevista em norma para estruturas com DPA Baixo. Com isso, apesar da previsão de um extravasor para segurança hidráulica, seu dimensionamento não será abordado neste trabalho, uma vez que suas características podem ser moldadas em função dos parâmetros hidrogeológicos apresentados anteriormente, e aplicados ao local em que a bacia se encontrará. Considera-se assim, o N.A. operacional equivalente a elevação da crista do maciço subtraído de 1,0 m de borda livre, e que o sistema extravasor garantirá borda livre em caso da passagem da cheia de projeto.

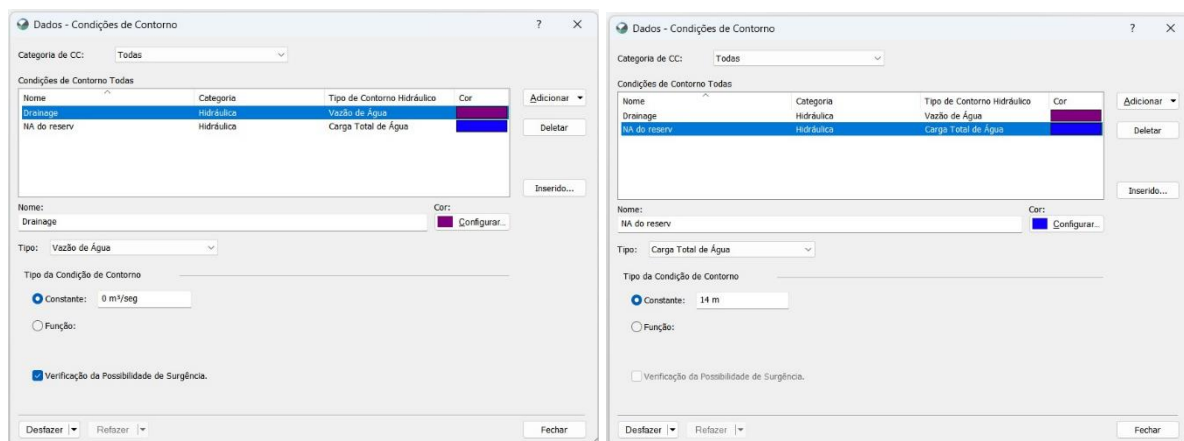
Para a determinação da linha freática nos diferentes cenários de estudo, foi utilizado o programa SEEP/W – GeoStudio®, versão 2024.2.1. Inicialmente, procede-se à construção dos pontos e das regiões que compõem a barragem. Neste trabalho, foram definidas as regiões correspondentes ao dreno e ao solo do corpo da barragem.

Na etapa seguinte, são criados os materiais com a atribuição de seus respectivos parâmetros físicos, sendo indicada a condição de análise como "saturada", além da definição do valor do coeficiente de permeabilidade.

Por se tratar de uma barragem homogênea, foram definidos apenas dois materiais: o solo de base e o dreno, que foram aplicados às regiões correspondentes do modelo. Após essa etapa, estabelecem-se as condições de contorno, adotando-se uma linha equipotencial de entrada na face do talude de montante, com carga total igual ao N.A. operacional (14 m). Para a saída, considera-se uma linha de "drainage" (default do programa), localizada nas faces da drenagem

interna, quando existente, ou na face do talude de jusante, nos casos em que a drenagem interna não está presente. As configurações das condições de contorno são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Condições de contorno aplicadas



Fonte: O Autor (2025)

3.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a realização das análises de estabilidade dos taludes, foi utilizado o programa SLOPE/W GeoStudio®, versão 2024.2.1. Inicialmente, na aba “Configurações”, deve-se selecionar a opção do “Tipo de Análise” que foi escolhida “Bishop” por ser barragem homogênea com opção Linha Piezométrica no campo Poropressão. Também é necessário marcar a opção “Aplicar o ajuste da linha freática”.

Na sequência, adotou-se a geometria, as regiões e os materiais previamente definidos na etapa de análise de fluxo.

Em seguida, na aba Superfície de Pesquisa, definiu-se a direção do movimento para cada talude, sendo, para o talude de montante, da direção da direita para a esquerda, e, para o talude de jusante, da esquerda para a direita.

Por fim, optou-se por definir a superfície de pesquisa, selecionando as opções “Dados” e, logo após, “Entrada e Saída”, para configurar as condições de contorno da análise. As configurações da superfície de pesquisa é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Superfície de pesquisa. a) Montante. b) Jusante

The figure shows two side-by-side screenshots of a software window titled "Aplicar Intervalo de Entrada e Saída de Superfície de Pesquisa".

Left Window (a) Montante:

- Intervalo de Entrada (lado Esquerdo):**
 - Tipo: Intervalo
 - Pt. à Esquerda: X: 30 m, Y: 15 m
 - Pt. à Direita: X: 35 m, Y: 15 m
 - Número de divisões: 8
- Intervalo de Saída (lado Direito):**
 - Tipo: Ponto
 - Pt. à Esquerda: X: 65 m, Y: 0 m
 - Pt. à Direita: X: , Y:
 - Número de divisões: 8
- Número de divisões do raio:** 4
- Controlar o Ângulo de Projeção:**
 - ☐ Usar Ângulo de Projeção Esquerda (Ativo): 135 °
 - ☐ Usar Ângulo de Projeção Direita (passivo): 45 °
- Buttons: Limpar, Fechar

Right Window (b) Jusante:

- Intervalo de Saída (lado):**
 - Tipo: Ponto
 - Pt. à Esquerda: X: 0 m, Y: 0 m
 - Pt. à Direita: X: , Y:
 - Número de divisões: 8
- Intervalo de Entrada (lado Direito):**
 - Tipo: Intervalo
 - Pt. à Esquerda: X: 30 m, Y: 15 m
 - Pt. à Direita: X: 35 m, Y: 15 m
 - Número de divisões: 8
- Número de divisões do raio:** 4
- Controlar o Ângulo de Projeção:**
 - ☐ Usar Ângulo de Projeção Esquerda (passivo): 135 °
 - ☐ Usar Ângulo de Projeção Direita (ativo): 45 °
- Buttons: Limpar, Fechar

Fonte: O Autor (2025)

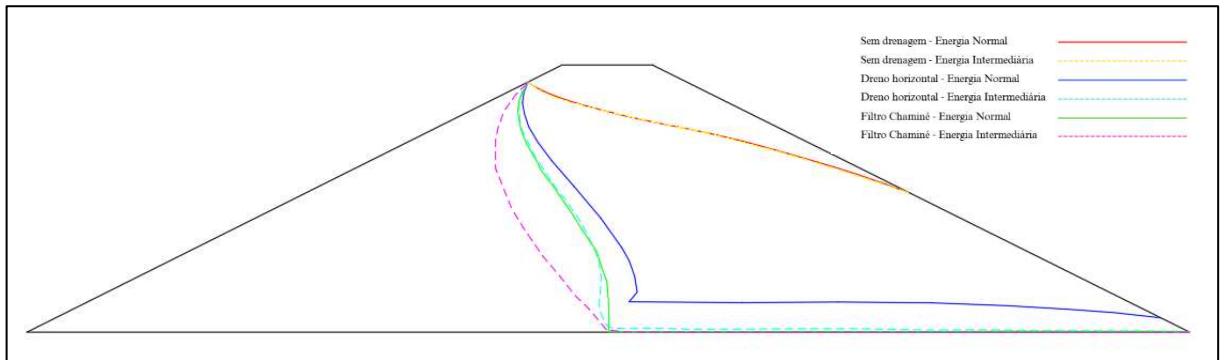
3.5 CENÁRIOS ANALISADOS

Para verificar a influência da drenagem interna na análise de estabilidade da estrutura, a modelagem foi realizada considerando apenas a condição de solicitação em regime de operação permanente (taludes de montante e jusante), uma vez que a versão estudantil do software utilizado não contempla todas as funcionalidades disponíveis na versão completa como regime transiente.

Além disso, variou-se a energia de compactação do solo do maciço entre os níveis de energia normal e intermediária, analisando-se também o comportamento da barragem nas configurações de drenagem: sem drenagem, com filtro chaminé e com tapete drenante. A energia de compactação modificada não foi considerada, pois os dados utilizados foram obtidos a partir de estudos anteriores que contemplavam apenas as energias normal e intermediária, sendo assim mantida a consistência com as informações disponíveis para garantir a comparabilidade dos resultados.

As condições de contorno descritas anteriormente foram aplicadas a cada um dos cenários analisados, resultando nas linhas de fluxo apresentadas na Figura 14. Essas linhas de fluxo foram utilizadas como base para subsidiar a análise de estabilidade do maciço.

Figura 14 - Linhas de fluxos obtidas no SEEP/W



Fonte: O Autor (2025)

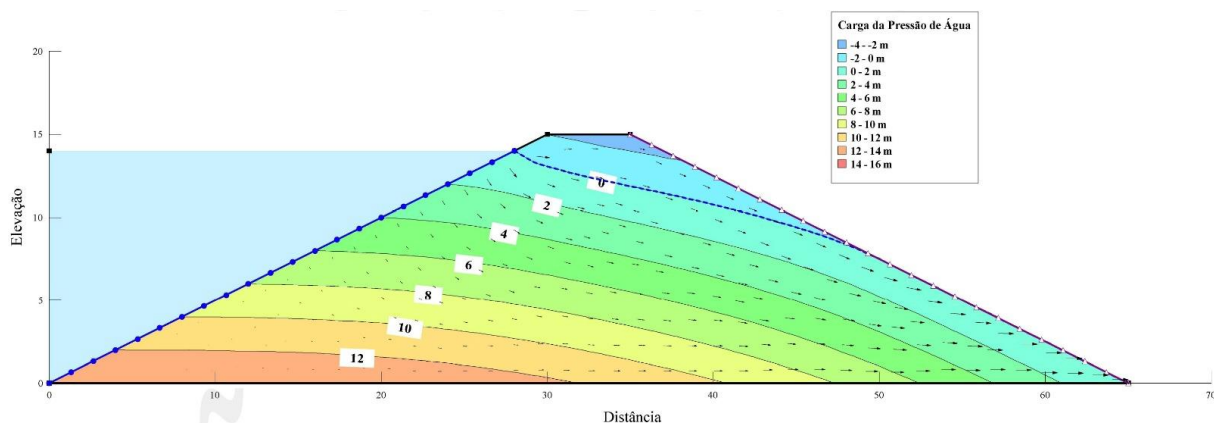
4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 BARRAGEM SEM SISTEMA DE DRENAGEM

4.1.1 ENERGIA NORMAL

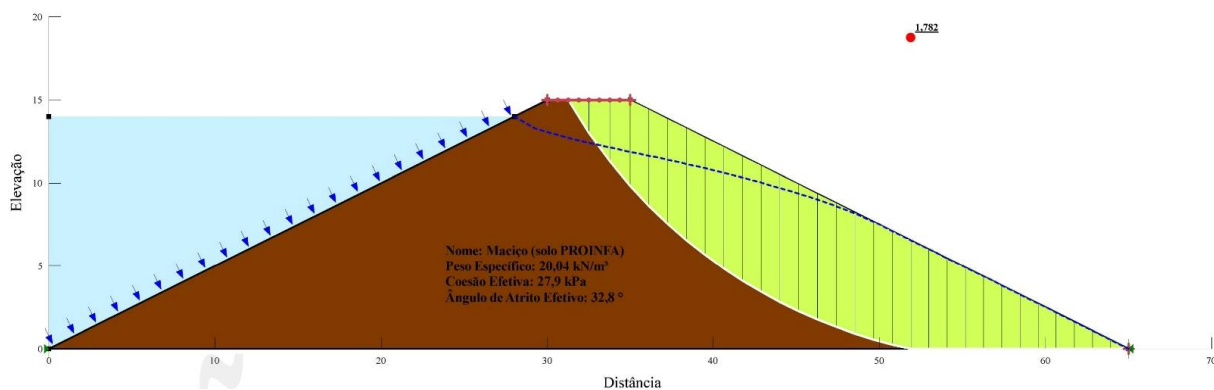
A Figura 15 apresenta a análise de fluxo, onde é possível observar a altura de saída do fluxo, permitindo visualizar o comportamento da água no interior da barragem, na configuração em que não há sistema de drenagem interna e maciço compactado na energia normal. Enquanto a Figura 16 (talude de jusante) e Figura 17 (talude de montante) apresentam os resultados referentes aos Fatores de Segurança (FS) obtidos nas análises de estabilidade, considerando a linha freática obtida na análise de fluxo.

Figura 15 - Configuração sem drenagem e Energia normal (Análise de Fluxo)



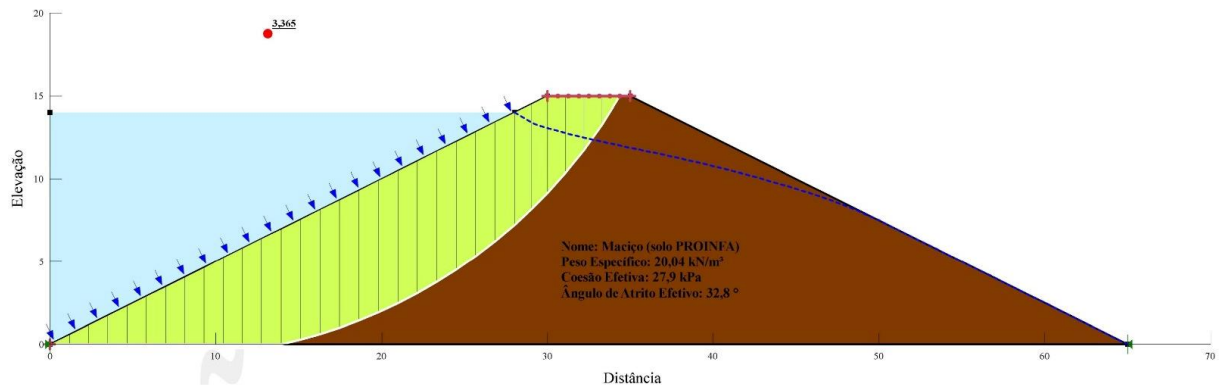
Fonte: O Autor (2025)

Figura 16 - Configuração sem drenagem e Energia normal (Talude de Jusante)



Fonte: O Autor (2025)

Figura 17 - Configuração sem drenagem e Energia normal (Talude de Montante)



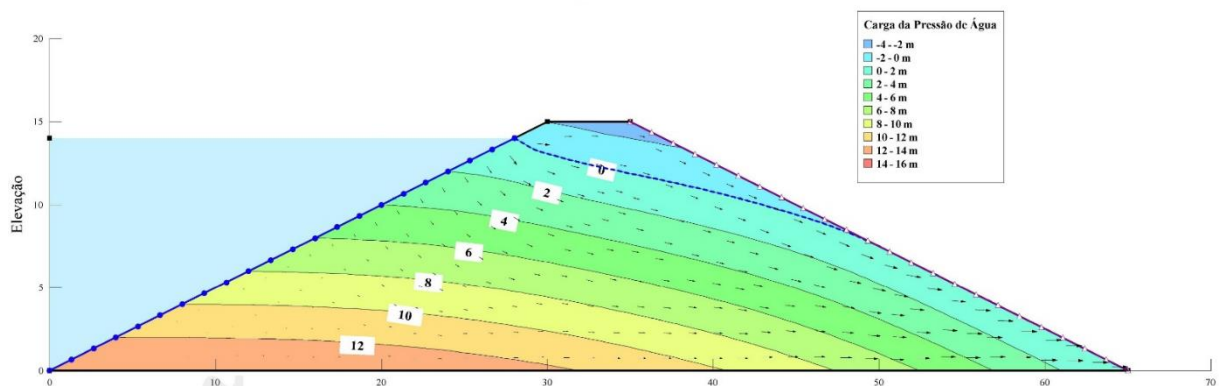
Fonte: O Autor (2025)

Observa-se que os valores obtidos de FS são adequados para garantir a estabilidade da barragem de acordo com o mínimo recomendado na literatura (1,5), sendo 1,782 e 3,365 para o talude de jusante e montante, respectivamente.

4.1.2 INTERMEDIÁRIA

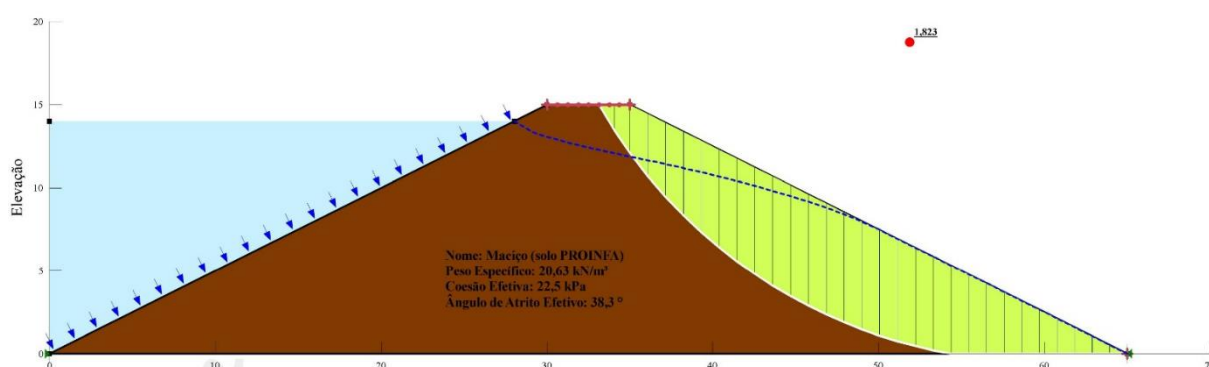
A Figura 18 apresenta a análise de fluxo, onde é possível observar a altura de saída do fluxo, permitindo visualizar o comportamento da água no interior da barragem, na configuração em que não há sistema de drenagem interna e maciço compactado na energia intermediária. Enquanto a Figura 19 (talude de jusante) e Figura 20 (talude de montante) apresentam os resultados referentes aos Fatores de Segurança (FS) obtidos nas análises de estabilidade, considerando a linha freática obtida na análise de fluxo.

Figura 18 - Configuração sem drenagem e Energia intermediária (Análise de Fluxo)



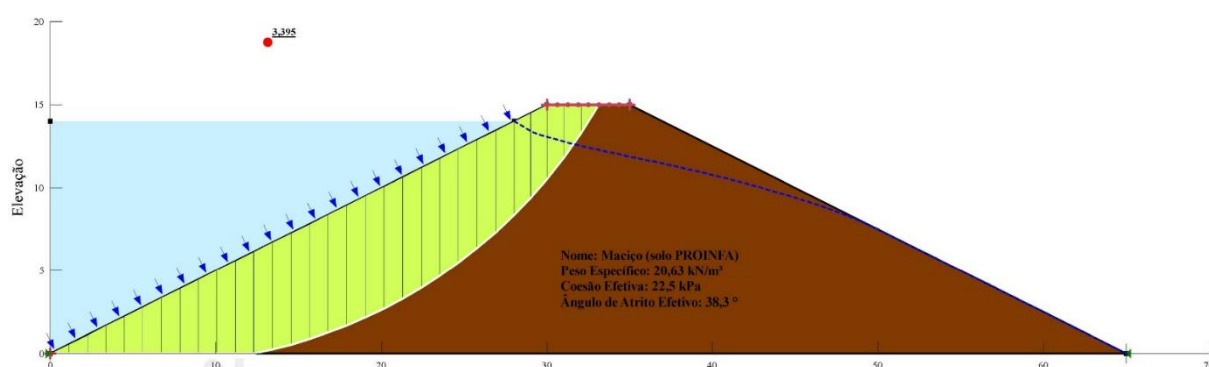
Fonte: O Autor (2025)

Figura 19 - Configuração sem drenagem e Energia intermediária (Talude de Jusante)



Fonte: O Autor (2025)

Figura 20 - Configuração sem drenagem e Energia intermediária (Talude de Montante)



Fonte: O Autor (2025)

Os valores obtidos de FS são adequados para garantir a estabilidade da barragem de acordo com o mínimo recomendado na literatura (1,5), sendo 1,823 e 3,395 para o talude de jusante e montante, respectivamente. Ao comparar os resultados com os da energia normal (Figura 16 e Figura 17), observa-se que, na condição de energia intermediária, houve um pequeno incremento nos valores, essa elevação indica uma melhoria na estabilidade da estrutura.

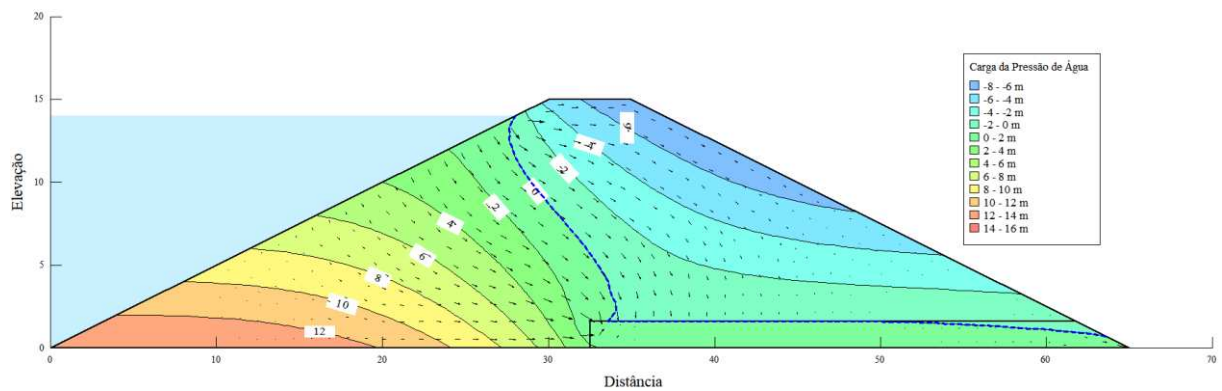
Em termos percentuais, observa-se que o incremento no Fator de Segurança (FS) foi maior no talude de jusante, com um aumento de aproximadamente 2,30%, ao passar de 1,782 para 1,823. No talude de montante, a elevação foi mais discreta, com um acréscimo de cerca de 0,89%, variando de 3,365 para 3,395.

4.2 DRENO HORIZONTAL

4.1.1 ENERGIA NORMAL

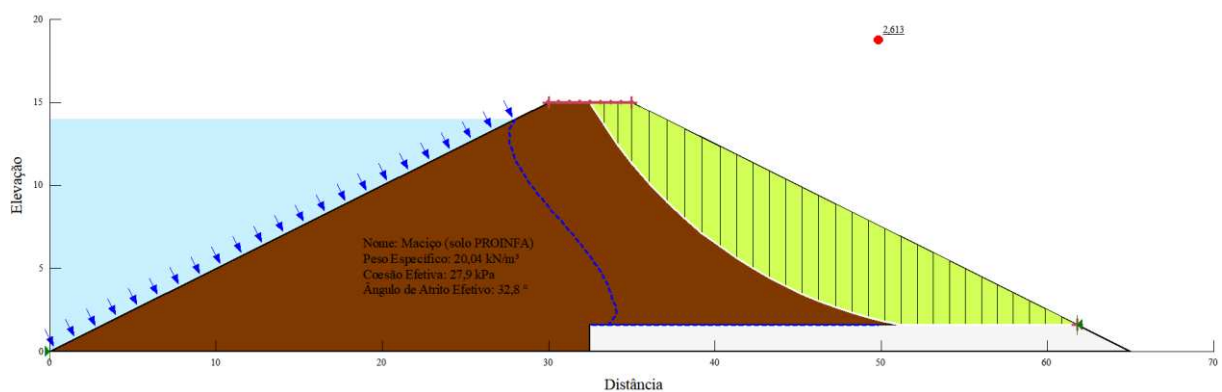
A Figura 21 apresenta a análise de fluxo, onde é possível observar a altura de saída do fluxo, permitindo visualizar o comportamento da água no interior da barragem, na configuração em que há dreno horizontal e maciço compactado na energia normal. Enquanto a Figura 22 (talude de jusante) e Figura 23 (talude de montante) apresentam os resultados referentes aos Fatores de Segurança (FS) obtidos nas análises de estabilidade, considerando a linha freática obtida na análise de fluxo.

Figura 21 - Configuração de Filtro horizontal e Energia normal (Análise de fluxo)



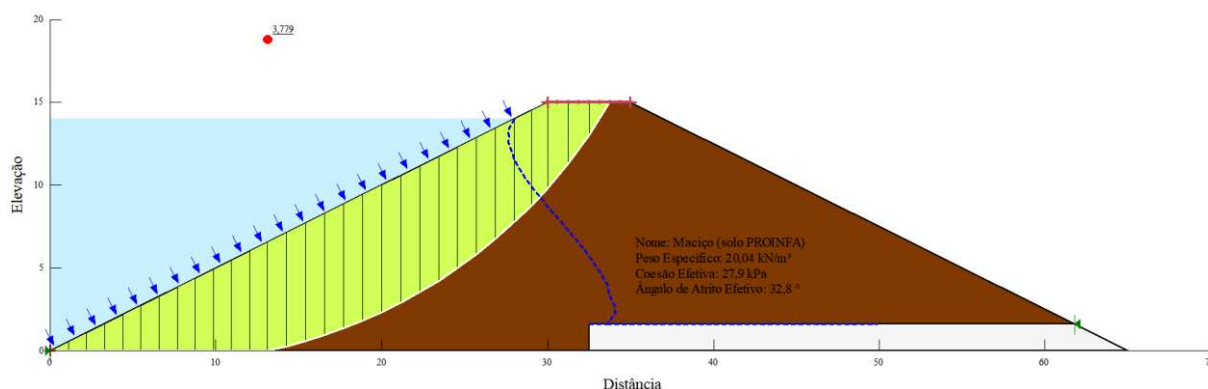
Fonte: O Autor (2025)

Figura 22 - Configuração de Filtro horizontal e Energia normal (Talude de Jusante)



Fonte: O Autor (2025)

Figura 23 - Configuração de Filtro horizontal e Energia normal (Talude de Montante)



Fonte: O Autor (2025)

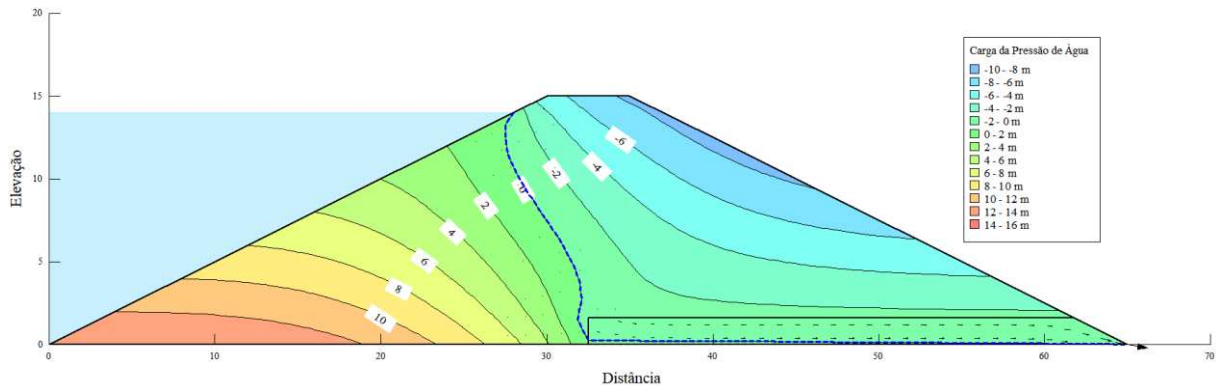
Os valores obtidos de FS são adequados para garantir a estabilidade da barragem de acordo com o recomendado na literatura (1,5), com 2,613 e 3,779 para o talude de jusante e montante, respectivamente. Ao comparar os resultados para configuração sem drenagem e o cenário com o dreno horizontal, ambos na energia normal, observa-se que houve um incremento nos valores, quando há a presença da drenagem.

Em termos percentuais, observa-se que o incremento no Fator de Segurança (FS) foi maior no talude de jusante, com um aumento de aproximadamente 47%, ao passar de 1,782 para 2,613. No talude de montante, também ocorreu um acréscimo, da ordem de 12%, variando de 3,365 para 3,779. Dessa forma, nota-se que a introdução do dreno horizontal proporciona um ganho na estabilidade, principalmente no talude de jusante.

4.1.2 ENERGIA INTERMEDIÁRIA

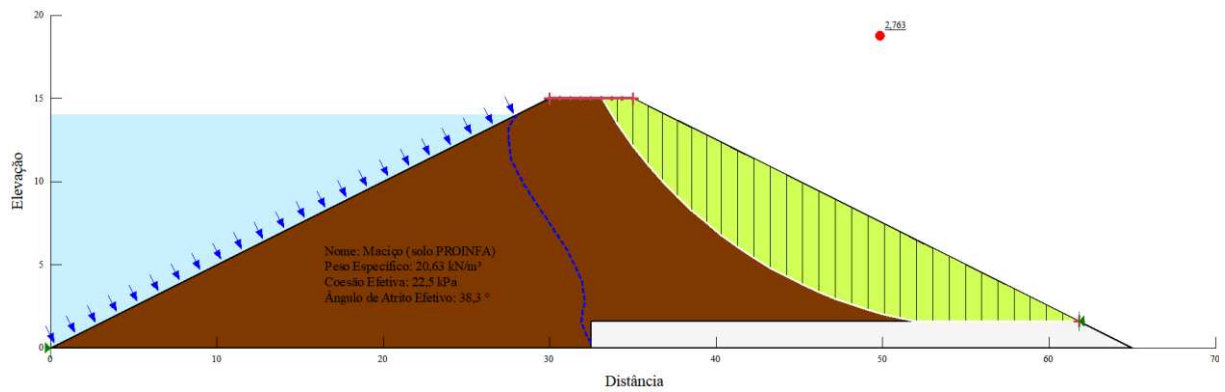
A Figura 24 apresenta a análise de fluxo, onde é possível observar a altura de saída do fluxo, permitindo visualizar o comportamento da água no interior da barragem, na configuração em que há dreno horizontal e maciço compactado na energia intermediária. Enquanto a Figura 25 (talude de jusante) e Figura 26 (talude de montante) apresentam os resultados referentes aos Fatores de Segurança (FS) obtidos nas análises de estabilidade, considerando a linha freática obtida na análise de fluxo.

Figura 24 - Configuração de Filtro horizontal e Energia intermediária (Análise de Fluxo)



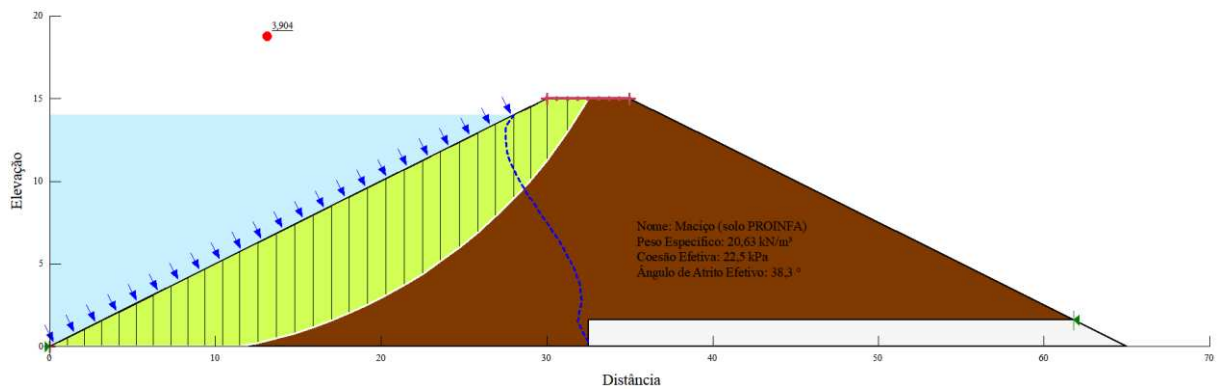
Fonte: O Autor (2025)

Figura 25 - Configuração de Filtro horizontal e Energia intermediária (Talude de Jusante)



Fonte: O Autor (2025)

Figura 26 - Configuração de Filtro horizontal e Energia intermediária (Talude de Montante)



Fonte: O Autor (2025)

Os valores obtidos de FS são adequados para garantir a estabilidade da barragem de acordo com o mínimo recomendado na literatura (1,5), sendo 2,763 e 3,904 para o talude de jusante e

montante, respectivamente. Ao comparar os resultados para configuração sem drenagem (Figura 19 e Figura 20), ambos na energia intermediária, observa-se que houve um incremento nos valores, quando há a presença da drenagem.

Em termos percentuais, observa-se que o incremento no Fator de Segurança (FS) foi maior no talude de jusante, com um aumento de aproximadamente 52%, ao passar de 1,823 para 2,763. No talude de montante, também ocorreu um acréscimo, da ordem de 15%, variando de 3,395 para 3,904. Dessa forma, nota-se mais uma vez que a introdução do dreno horizontal proporciona um ganho na estabilidade, em relação à situação sem sistema de drenagem interna.

Quanto à variação da energia de compactação para a configuração com dreno horizontal, percebe-se que a adoção da energia intermediária (Figura 25 e Figura 26) resultou em um incremento nos Fatores de Segurança em relação à energia normal (Figura 22 e Figura 23). No talude de jusante, o FS aumentou aproximadamente 6%, passando de 2,613 para 2,763. Já no talude de montante, a elevação foi mais discreta, da ordem de 3%, variando de 3,779 para 3,904. Esses resultados indicam que o aumento da energia de compactação promove uma melhora adicional na estabilidade da estrutura, embora em menor magnitude quando comparada ao impacto gerado pela presença do sistema de drenagem.

4.3 FILTRO CHAMINÉ COM DRENO HORIZONTAL

4.1.1 ENERGIA NORMAL

A Figura 27 apresenta a análise de fluxo, onde é possível observar a altura de saída do fluxo, permitindo visualizar o comportamento da água no interior da barragem, na configuração em que há filtro vertical em conjunto com dreno horizontal e maciço compactado na energia normal. Enquanto a Figura 28 (talude de jusante) e Figura 29 (talude de montante) apresentam os resultados referentes aos Fatores de Segurança (FS) obtidos nas análises de estabilidade, considerando a linha freática obtida na análise de fluxo.

Figura 27 - Configuração de Filtro vertical e Energia normal (Análise de Fluxo)

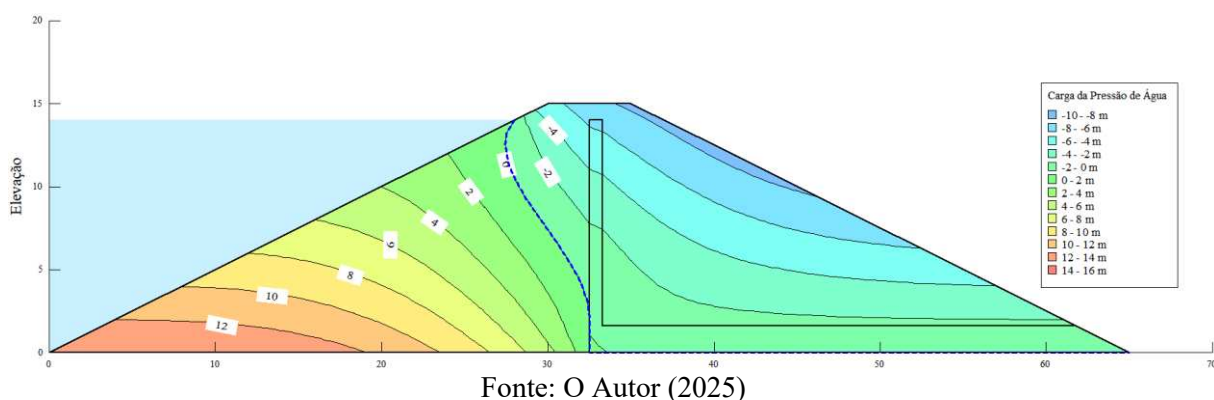


Figura 28 - Configuração de Filtro vertical e Energia normal (Talude de Jusante)

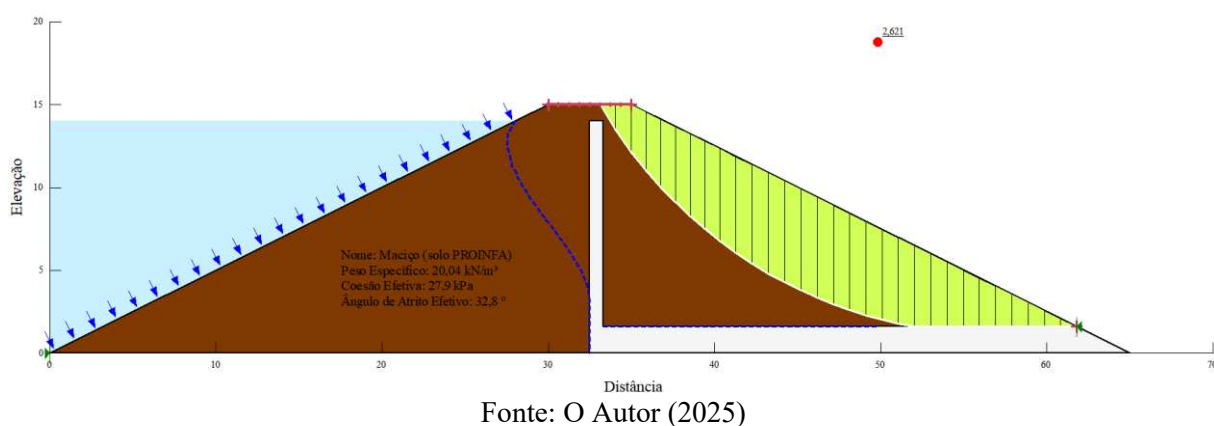
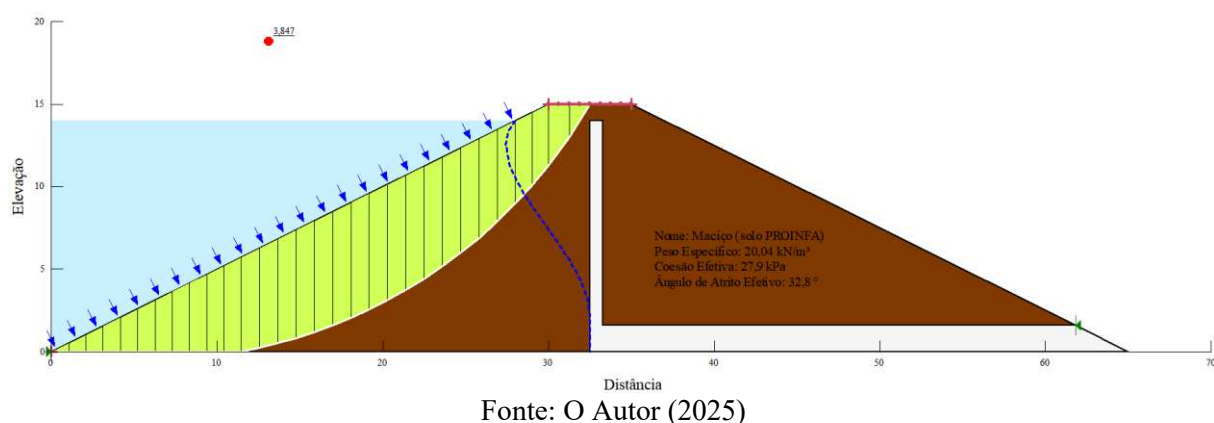


Figura 29 - Configuração de Filtro vertical e Energia normal (Talude de Montante)



Os valores obtidos de FS com a inclusão do filtro vertical na energia normal são adequados para garantir a estabilidade da barragem, conforme o mínimo recomendado na literatura (1,5), apresentando 2,621 e 3,847 para os taludes de jusante e montante, respectivamente. Ao comparar esses resultados com a configuração sem drenagem interna (Figura 19 e Figura 20), ambos na energia normal, observa-se que houve um incremento nos valores de FS com a presença do filtro vertical.

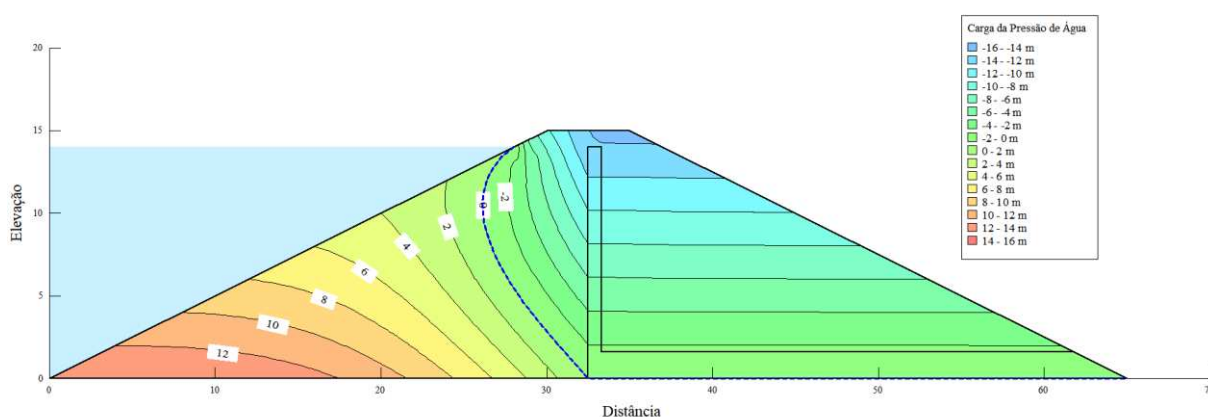
Em termos percentuais, o incremento no Fator de Segurança (FS) no talude de jusante foi de aproximadamente 47%, passando de 1,782 para 2,621. No talude de montante, ocorreu um acréscimo da ordem de 14%, variando de 3,365 para 3,847, quando comparado com a configuração sem drenagem interna.

Quando comparado ao cenário com o dreno horizontal (Figura 22 e Figura 23), ambos na energia normal, a inclusão do filtro vertical resultou em um incremento discreto. No talude de jusante, o FS aumentou cerca de 0,31%, passando de 2,613 para 2,621, enquanto no talude de montante, a elevação foi de aproximadamente 1,80%, variando de 3,779 para 3,847. Esses resultados indicam que, sob o aspecto de dimensionamento, tanto o filtro vertical quanto o dreno horizontal contribuem para a estabilidade da estrutura em relação à ausência de drenagem, com diferenças de desempenho relativamente pequenas entre os dois sistemas.

4.1.2 ENERGIA INTERMEDIÁRIA

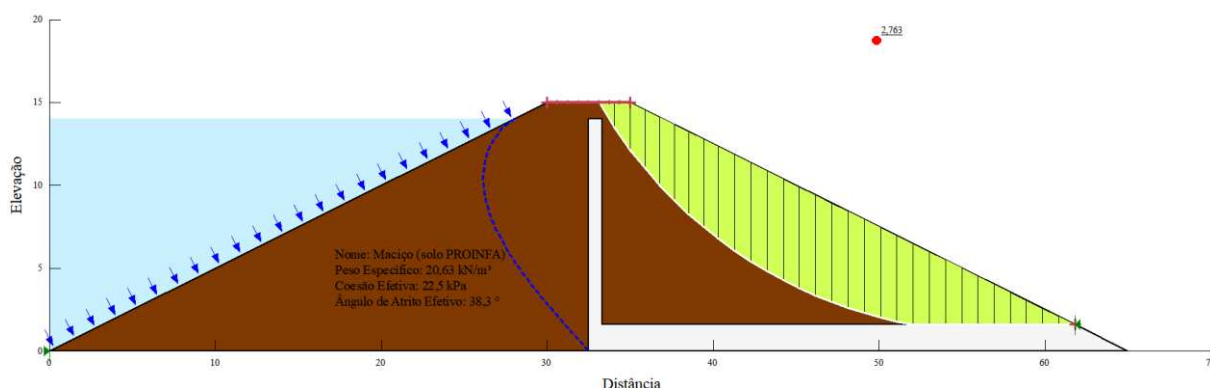
A Figura 30 apresenta a análise de fluxo, onde é possível observar a altura de saída do fluxo, permitindo visualizar o comportamento da água no interior da barragem, na configuração em que há filtro vertical em conjunto com dreno horizontal e maciço compactado na energia intermediária. Enquanto a Figura 31 (talude de jusante) e Figura 32 (talude de montante) apresentam os resultados referentes aos Fatores de Segurança (FS) obtidos nas análises de estabilidade, considerando a linha freática obtida na análise de fluxo.

Figura 30- Configuração de Filtro vertical e Energia intermediária (Análise de fluxo)



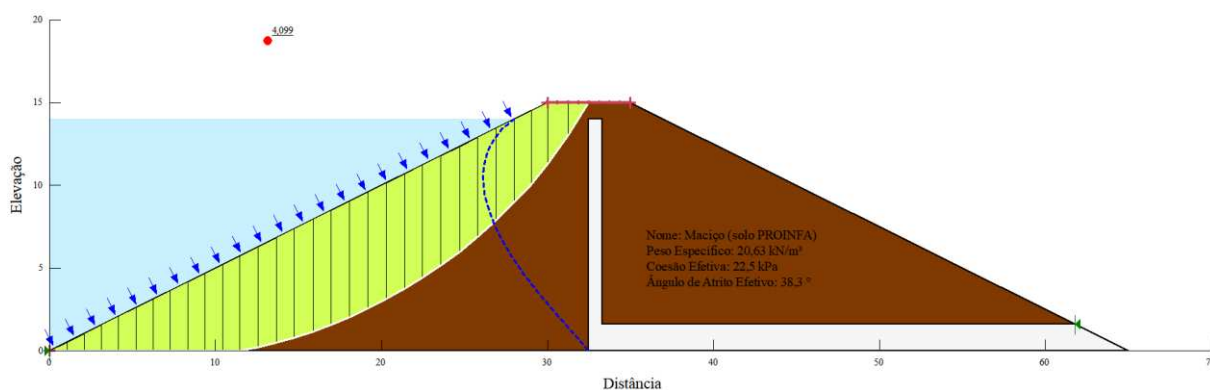
Fonte: O Autor (2025)

Figura 31 - Configuração de Filtro vertical e Energia intermediária (Talude de Jusante)



Fonte: O Autor (2025)

Figura 32 - Configuração de Filtro vertical e Energia intermediária (Talude de Montante)



Fonte: O Autor (2025)

Os valores obtidos de FS com a inclusão do filtro vertical na energia intermediária são adequados para garantir a estabilidade da barragem, conforme o mínimo recomendado na literatura (1,5), apresentando 2,763 e 4,099 para os taludes de jusante e montante, respectivamente.

Ao comparar esses resultados com a configuração sem drenagem interna (Figura 19 e Figura 20), ambos na energia intermediária, observa-se que houve um incremento nos valores de FS com a presença do filtro vertical. No talude de jusante, o FS aumentou aproximadamente 52%, passando de 1,823 para 2,763. No talude de montante, o acréscimo foi da ordem de 21%, variando de 3,395 para 4,099.

Quando comparado ao cenário com o dreno horizontal (Figura 25 e Figura 26), ambos na energia intermediária, observa-se que não houve diferença no talude de jusante, mantendo-se o

FS em 2,763. Já no talude de montante, ocorreu um incremento de aproximadamente 5%, passando de 3,904 para 4,099 com a adoção do filtro vertical.

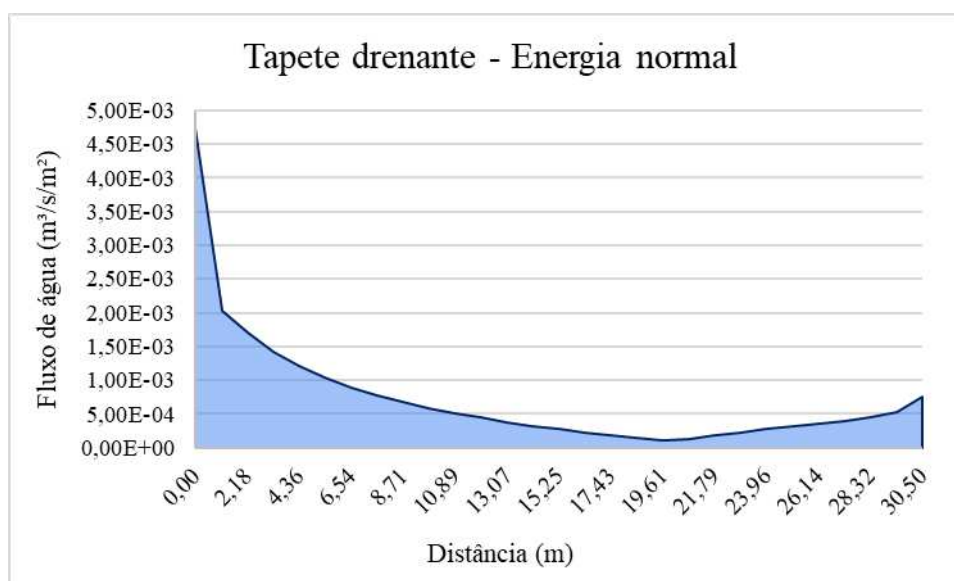
Por fim, ao comparar o filtro vertical na energia normal (Figura 28 e Figura 29) com o filtro vertical na energia intermediária, nota-se um aumento no FS. No talude de jusante, o incremento foi de cerca de 5%, variando de 2,621 para 2,763. No talude de montante, a elevação foi aproximadamente 7%, passando de 3,847 para 4,099. Esses resultados indicam que o aumento da energia de compactação promove ganhos adicionais na estabilidade, mesmo quando já há a presença de um sistema de drenagem, como o filtro vertical.

4.4 VAZÕES PARA DIMENSIONAMENTO DO DRENO

A área sob o gráfico do fluxo de água em relação à distância representa o volume de água que passou por metro de largura ao longo do percurso analisado, ou seja, é a vazão linear a ser verificado no dimensionamento da drenagem. Os gráficos são gerados através dos pontos extraídos da análise de fluxo SEEP/W – GeoStudio® versão 2024.2.1.

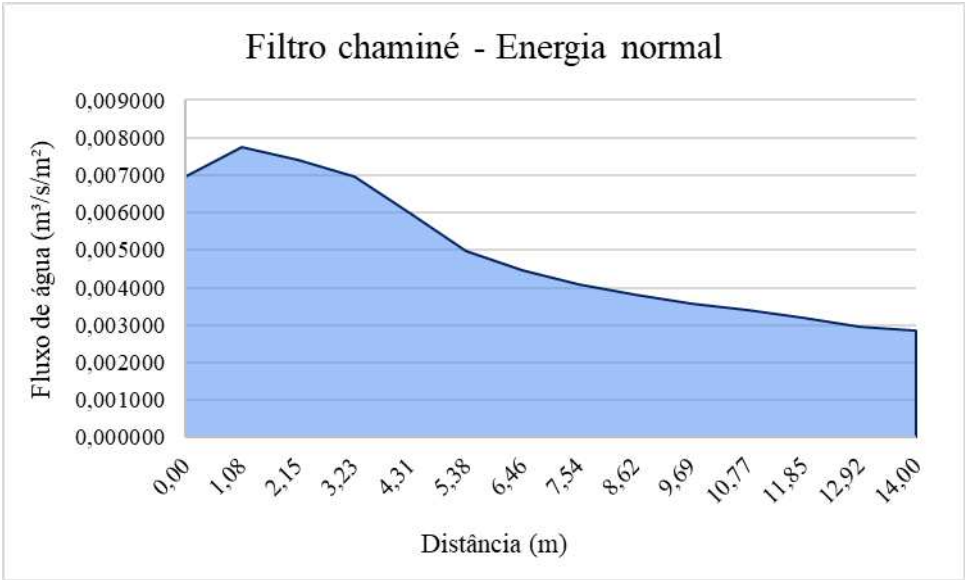
A Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36 apresentam a área correspondente ao fluxo que chega na drenagem interna, enquanto o Quadro 13 apresenta o resumo das vazões máximas obtidas no filtro.

Figura 33 - Fluxo de água na drenagem horizontal (energia normal)



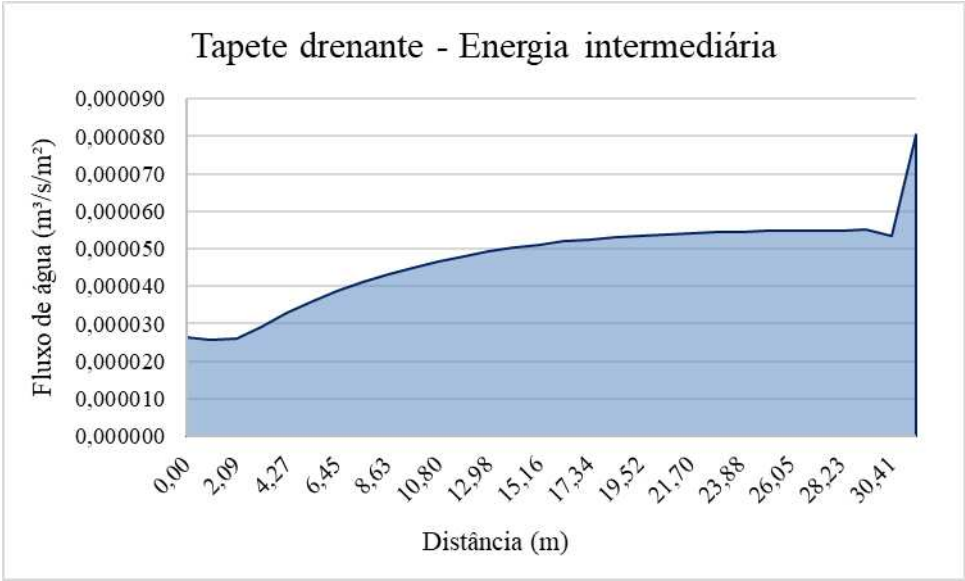
Fonte: O Autor (2025)

Figura 34 - Fluxo de água na drenagem vertival (energia normal)



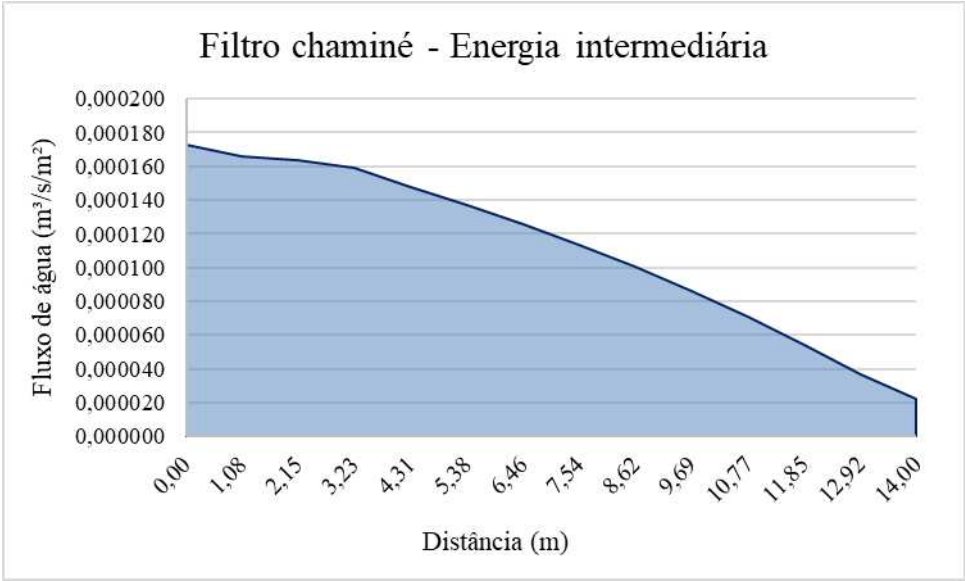
Fonte: O Autor (2025)

Figura 35 - Fluxo de água na drenagem horizontal (energia intermediária)



Fonte: O Autor (2025)

Figura 36 - Fluxo de água na drenagem vertical (energia intermediária)



Fonte: O Autor (2025)

Quadro 13 - Resumo das vazões para os diferentes cenários

Situação	Vazão (m³/s)
Vertical - Normal	0,0004803
Horizontal - Normal	0,0000396
Vertical - Intermediária	0,0000989
Horizontal - Intermediária	0,0000218

Fonte: O Autor (2025)

A partir das equações de cálculo descritas no item 3.1 da metodologia, foram calculadas as larguras mínimas dos filtros/drenos conforme descrito no Quadro 14.

Quadro 14 - Largura mínima calculada

Situação	Vazão com o FS aplicado (m³/s)	B(m)
Vertical - Normal	0,004803	0,48
Horizontal - Normal	0,000396	1,60
Vertical - Intermediária	0,000989	0,10
Horizontal - Intermediária	0,000218	1,19

Fonte: O Autor (2025)

No caso do dreno vertical, a largura mínima calculada para ambos os níveis de energia de compactação (normal e intermediária) resultou em valores inferiores ao recomendado na literatura. Por isso, optou-se por adotar a largura mínima de 0,80 m, conforme sugerido por Cruz (1996), a fim de garantir viabilidade construtiva e eficiência hidráulica. Para o dreno horizontal, as alturas obtidas nos dois cenários também respeitam os limites estabelecidos na

bibliografia, permanecendo abaixo de 2,00 m, valor máximo indicado para esse tipo de elemento drenante.

4.5 RESUMO DOS CENÁRIOS ANALISADOS

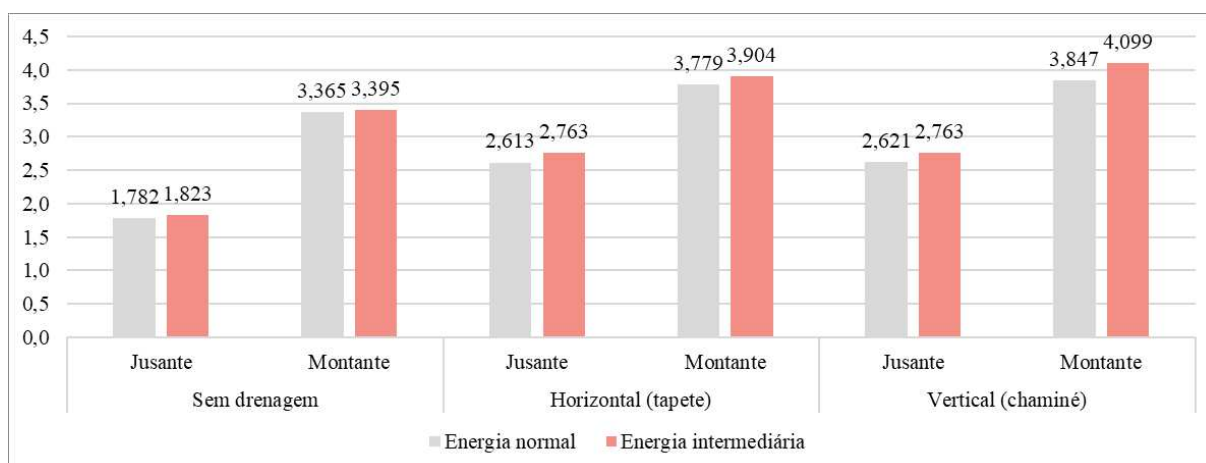
Os resultados obtidos para todos os cenários em termos de FS e talude estão sintetizados no Quadro 15 e na Figura 37.

Quadro 15 - Resumo dos resultados para os diferentes cenários

Compactação	Drenagem	Talude	FS
Energia normal	Sem drenagem	Jusante	1,782
		Montante	3,365
	Horizontal (tapete)	Jusante	2,613
		Montante	3,779
	Vertical (chaminé)	Jusante	2,621
		Montante	3,847
Energia intermediária	Sem drenagem	Jusante	1,823
		Montante	3,395
	Horizontal (tapete)	Jusante	2,763
		Montante	3,904
	Vertical (chaminé)	Jusante	2,763
		Montante	4,099

Fonte: O Autor (2025)

Figura 37 - Comparação do Fator de Segurança para os diferentes cenários



Fonte: O Autor (2025)

Verifica-se que a presença de sistemas de drenagem proporcionou um aumento nos valores do fator de segurança (FS), especialmente no talude de jusante. Em ambas as energias de compactação, a ausência de drenagem resultou nos menores FS observados, com valores que

permaneceram abaixo de 1,9 para jusante, enquanto a montante ficaram próximos a 3,4. A adição de drenagem, seja horizontal (tapete) ou vertical (chaminé), elevou consideravelmente os índices de segurança, destacando-se como elemento fundamental para a estabilidade.

Comparando os sistemas de drenagem, observou-se que ambos, tapete e chaminé, apresentaram comportamento equivalente no talude de jusante, com incrementos de FS próximos de 5,7% ao se passar da compactação normal para a intermediária. Entretanto, no talude de montante, a drenagem vertical demonstrou desempenho superior, atingindo o maior FS dentre todas as configurações analisadas (4,099), o que representa um acréscimo aproximado de 6,6% em relação à energia normal. Esse resultado evidencia que a drenagem vertical possui maior eficiência na redução das poropressões internas, principalmente a montante.

Quanto ao efeito da compactação, verificou-se que o aumento da energia de normal para intermediária gerou incrementos moderados nos fatores de segurança, sendo mais expressivos nas situações com drenagem. Sem drenagem, os acréscimos foram pouco relevantes, variando entre 1,1% e 2,3%, indicando que a compactação isoladamente não é suficiente para garantir níveis elevados de estabilidade. Por outro lado, com drenagem, os ganhos foram mais robustos, especialmente no talude de jusante, com aumentos de até 5,7%.

Em todas as configurações, os fatores de segurança foram consistentemente superiores no talude de montante em comparação ao de jusante. As diferenças foram marcantes, variando de aproximadamente 50% a mais de 90%, dependendo da configuração, reforçando que o talude de jusante representa a condição mais crítica do ponto de vista da estabilidade.

Portanto, a análise dos resultados confirma que a combinação entre sistemas de drenagem, preferencialmente vertical, e energia de compactação intermediária representa a solução mais eficaz para otimização dos fatores de segurança, enquanto a ausência de drenagem se mostrou insuficiente, resultando em valores de FS inadequados, principalmente para o talude de jusante.

Além dos resultados numéricos, é importante destacar que a configuração com filtro em chaminé apresenta vantagens construtivas em relação à configuração com filtro horizontal. Isso porque, devido ao processo de compactação em camadas sucessivas, é comum a formação de caminhos preferenciais de fluxo entre essas interfaces. A presença do filtro vertical permite a

interceptação mais eficiente desses caminhos, promovendo o redirecionamento da percolação e contribuindo para o aumento do fator de segurança, especialmente no talude de jusante. Dessa forma, mesmo em cenários onde os fatores de segurança são similares, a configuração em chaminé tende a ser preferível do ponto de vista técnico e construtivo.

É importante ressaltar que, embora a drenagem interna e superficial exerça papel fundamental na estabilidade de barragens, ela não deve ser considerada isoladamente no processo de projeto. Da mesma forma, o fator de segurança mais elevado não deve ser o único critério adotado para a seleção do sistema de drenagem ou tipo de filtro. Outros aspectos igualmente relevantes devem ser avaliados, como viabilidade construtiva, custos de execução, facilidade de manutenção, comportamento hidráulico ao longo do tempo, além da compatibilidade entre os materiais utilizados. A escolha do sistema mais adequado deve, portanto, considerar uma abordagem integrada, que alie segurança, eficiência técnica e viabilidade prática, garantindo o desempenho da estrutura ao longo de sua vida útil.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou avaliar a eficiência de diferentes modelos de drenagem interna em barragens de terra homogêneas de pequeno porte, considerando também o impacto da energia de compactação sobre a estabilidade estrutural. A análise comparativa, fundamentada em modelagens de estabilidade dos taludes de montante e jusante, permitiu identificar tendências importantes e fornecer subsídios técnicos para a tomada de decisão no dimensionamento dessas estruturas.

Os resultados demonstraram que a adoção de sistemas de drenagem interna, sejam horizontais (tapete drenante) ou verticais (filtro chaminé), promoveu em termos de dimensionamento, aumentos significativos no fator de segurança (FS), sobretudo no talude de jusante, tradicionalmente mais vulnerável à instabilidade. Dentre os sistemas analisados, a drenagem vertical destacou-se, principalmente no talude de montante, onde apresentou os maiores valores de FS, indicando maior eficiência na redução das pressões internas e na promoção da segurança estrutural.

Adicionalmente, verificou-se que o aumento da energia de compactação do solo resultou em ganhos moderados de estabilidade, que se tornaram mais expressivos quando associados à presença de sistemas de drenagem. Por outro lado, a compactação, quando considerada isoladamente, apresentou níveis de influência menores na estabilidade, especialmente nas condições sem drenagem.

Em síntese, a combinação entre compactação intermediária e drenagem vertical revelou-se a solução mais eficaz para otimizar os fatores de segurança da barragem analisada, assegurando níveis de estabilidade adequados com ganhos técnicos e operacionais. Por sua vez, a ausência de drenagem mostrou-se pouco eficiente, mesmo quando associada a maior energia de compactação.

Como contribuição, este estudo reforça a importância do emprego criterioso de sistemas de drenagem na engenharia de barragens, especialmente em estruturas homogêneas de pequeno porte, evidenciando que soluções simples podem proporcionar melhorias substanciais na segurança e na longevidade dessas obras.

Por fim, recomenda-se que futuros estudos considerem cenários adicionais, como a análise em condições transitórias ou de rebaixamento rápido do nível d'água, bem como consideração de atividade sísmica. Ademais, avaliar investigações sobre o comportamento da fundação, aspectos que podem complementar e aprofundar as conclusões aqui apresentadas.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, D. P. O. **Contribuição ao estudo e ao índice de segurança de barragens - ISB**. 2014. 166 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2014.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711 - 728, 2013.

ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens: Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens - Volume V**. Brasília, 2016, 160 p.

ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Ministério do Desenvolvimento Regional. Relatório de Segurança de Barragens: 2020**. Brasília: 2021. 132 p. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020/rsb-2020.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2024.

ANDRADE, A.V. de. **Dimensionamento de Sistemas de Drenagem Interna de Uma Barragem**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFJF, Juiz de Fora, 2016, 61p.

ANDRÉ, J.L.F.; VALLADARES, C S.; DUARTE, B.P. Complexo Juiz de Fora na região de Três Rios (RJ): Litogeoquímica, Geocronologia U-Pb (LA-ICPMS) e Geoquímica Isotópica de Nd e Sr. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, p. 773-793, 2009.

BEVEN, K. J.; ALCOCK, R. Modelling everything everywhere: a new approach to decision making for water management under uncertainty. **Freshwater Biology**, v. 56, p. 124–132, 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 30 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.066**, de 30 de setembro de 2020. [2020b]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm. Acesso em: 30 jun. 2024.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.

CASTRO, Y. V.; MELO, J. A. **Comportamento mecânico e hidráulico de mistura compactada de solo argiloso com cinza de cavaco de eucalipto**. Relatório de Iniciação Científica. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2020.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, Materiais de Construção, Projeto**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos: FAPESP, 1996.

EIRADO, L. G.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J. C. H. Os terrenos tectônicos da Faixa Ribeira na Serra da Bocaina e na Baía da Ilha Grande, sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, p. 426-436, 2006.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. 2003.

FONSECA, M. N. E. **Análise dos modos de falha e efeitos (FMEA) para avaliação de um acidente em barragem de rejeitos**: Um evento de mineração no Brasil. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Bahia, 2018.

FREIRE NETO, J. P. **Estudo da liquefação em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade**. 2009. 184 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto - MG, Brasil, 2009.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Decreto 48.140**, 2021. Regulamenta dispositivos da Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens, estabelece medidas para aplicação do art. 29 da Lei nº 21.972, de 21 de janeiro de 2016, e dá outras providências.

GATTO, L.C.S.; RAMOS, V.L.S.; NUNES, B. T. A.; MAMEDE, L.; GÓES, M. H. B.; MAURO, C. A.; ALVARENGA, S. M.; FRANCO, E. M. S.; QUIRICO, A. F. & NEVES, L. B. Geomorfologia. **Projeto RADAMBRASIL**, Brasília: DNPM, v. 32, p. 305-384, 1983.

GUIMARÃES, C. J. P. **Aspectos de segurança em barragens de rejeitos: foco nos sistemas de drenagem**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Fluminense, 2019.

HASUI, Y. A grande colisão pré-cambriana do Sudeste brasileiro e a estruturação regional. **Geociências (São Paulo. Impresso)**, v. 20, p. 141-169, 2010.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos**. O Caso UHE São Simão. 230 p. dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

MARCELINO, M. M. de. **Análise do comportamento hidráulico de solo argiloso com presença de cinzas de cavaco de eucalipto proveniente de processo industrial.** Trabalho de Conclusão de Curso, UFJF, Juiz de Fora, 2023, 44 p.

MARIANO, D. C. L.; SILVA, J. B. Earth dams: features of your raising. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 11, p. e277111133469, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33469. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/33469>. Acesso em: 30 de jan. 2025.

MASSAD, F. Obras de Terra: curso básico de geotecnia. 2ª ed. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2010.

MATOS, J. M. V. **Modo de falha crível em barragens de rejeito de mineração: Uma análise das variáveis condicionantes e proposição de um modelo preditor.** Monografia de conclusão de curso, Universidade Federal de Ouro Preto, 2023.

MENDES, S. V. - **Rotura de barragens de aterro por galgamento: caracterização laboratorial do hidrograma efluente da rotura.** 2017. Dissertação (Mestrado), Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2017.

OLIVEIRA JUNIOR, M. R. (2014) **Estabilidade de Talude do Campus da UFJF.** Relatório de Pesquisas. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, p. 34.

OLIVEIRA, P. H. de A. **Problemas Hidrogeológicos em Barragens Envolvendo O Mecanismo De Retroerosão Tubular.** Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2012. 73 p.

PEREIRA, T. S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BRAGA, F. V. A.; ROSSO, R. B. Performance of analysis methods of slope stability for different geotechnical classes soil on earth dams. **Engenharia Agrícola**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1027-1036, nov./dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1027-1036/2016>.

PETROCELLI, P. S. **Avaliação da influência do sistema de drenagem inclinado durante o regime operacional transiente de uma barragem de terra.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, 2019.

PIZARRO TAPIA, R.; TAPIA CORNEJO, M.; ROMÁN ARELLANO, L.; JORDÁN DÍAZ, C.; FARÍAS DAZA, C. **Coeficientes de escorrência instantâneos para a cuenca del río Tutuvén, VII Región del Maule, Chile.** Bosque, Valdivia, v. 27, n. 2, p. 83-91, 2006.

QUEIROZ, B. H. R.; CARDOSO, D. M.; ANDRADE, M. da R.; MARCELINO, M. M.; RODRIGUEZ, T. T.; ALMEIDA, J. R. de; MARTINS, C. de P. **Análise da Influência da Adição de Cinza de Cavaco de Eucalipto nos Parâmetros de Resistência de Solo Residual Maduro**

Compactado em Diferentes Energias. **18 Congresso Nacional de Geotecnia**, Évora-Portugal, ano 2023, n. 18, p. 1317-1326, 17 maio 2023.

RUTLEDGE, S. JEFFERIES M, BEEN K. Soil liquefaction: a cristal state approach, 2nd edition. **Environ Earth Sci** 75, 1014 (2016). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5600-y> Acesso em: 30 jun. 2024.

SANTOS A. L. C, SOUZA JÚNIOR A. O, SANTOS G. B. Geodiversidade e ocupação urbana de Juiz de Fora: Possibilidades e desafios. **Principia: Caminhos da Iniciação Científica**, [S. l.], v. 22, 2022. DOI: 10.34019/2179-3700.2022.v22.37903. Disponível em: <https://periodicos.ufjf.br/index.php/principia/article/view/37903>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SILVA, D. S. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, 2016.

SILVA L.C., ARMSTRONG R., NOCE C.M., CARNEIRO M.A., PIMENTEL M.M., PEDROSA-SOARES A.C., LEITE C.A., VIEIRA V.S., SILVA M.A., PAES V.J.C., CARDOSO-FILHO J.M. Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, parte II: Orógeno Araçuaí, Cinturão Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, 513-528 p, 2002.

SOUSA PINTO, C. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 2ª ed. **São Paulo: Oficina de Textos**, 2002, 355 p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 2ª ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1962.

TRINDADE, T. P. da; LIMA, D. C. de; CARVALHO, C. A. B. de; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S. Compactação de solos. In: Simpósio Brasileiro sobre Colheita e Transporte Florestal, 6, 2003, Belo Horizonte - MG. **Anais Eletrônicos**. Viçosa: UFV/SIF, 2003.

TUPINAMBÁ, M.; HEILBRON, M.; DUARTE, B. P.; NOGUEIRA, J. R.; VALLADARES, C.; ALMEIDA, J. C. H.; SILVA, L. G. E.; MEDEIROS, S. R.; GUIA, C.; MIRANDA, A. W. A.; RAGATKI, C. D.; MENDES, J.; LUDKA, I. Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. **Geonomos**, v. XV, p. 67-79, 2007

USACE. **Seepage Analysis and Control for Dams**. 1º. ed. Washington: USCE, 1986.