



MARIA EDUARDA FERNANDES BORBA

**PROJETO DE BARRAGEM DE PEQUENO PORTE COM
FILTRAÇÃO EM GEOTÊXTIL**

**LAVRAS - MG
2023**

MARIA EDUARDA FERNANDES BORBA

**PROJETO DE BARRAGEM DE PEQUENO PORTE COM FILTRAÇÃO EM
GEOTÊXTIL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

MARIA EDUARDA FERNANDES BORBA

**PROJETO DE BARRAGEM DE PEQUENO PORTE COM FILTRAÇÃO EM
GEOTÊXTIL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 27 de fevereiro de 2023

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido (UFLA)

Prof^a. Dr. Raquel Mariano Linhares (UFLA)

Prof. Dr. Paulo Roberto Borges (UFLA)



Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela força e discernimento que me foram proporcionados, e principalmente pela aproximação que tive d'Ele nesse final da graduação. Foi o combustível para que eu pudesse seguir em frente.

À minha mãe, Mariselma, por sempre acreditar em mim, me amparar, me dar todo o suporte que eu necessitava e por ser minha âncora.

Ao meu pai, Fernando, pois com seu jeito todo peculiar, nunca mediu esforços para me auxiliar e estar presente em todos os momentos.

À minha família, que apesar da distância, nunca deixou de torcer por mim e exaltar a torcida com meu futuro e carreira.

À Universidade Federal de Lavras, que me possibilitou uma excelente graduação e abriu portas a caminhos que eu nem imaginava poder trilhar. Em especial, agradeço também ao GEOTEC, Núcleo de Estudos em Geotecnia, e todos os colegas com os quais pude ter contato, pois me possibilitaram muito conhecimento e vivência.

Ao Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido, por toda a atenção, disponibilidade, apoio e confiança que depositou em mim desde o nosso primeiro contato, sendo por meio do GEOTEC, do programa de monitoria ao qual fui sua orientada e também na realização deste trabalho.

À “Casa 155 e agregados”, por 5 anos maravilhosos de convivência, amor, carinho, suporte e paciência. Digo com propriedade que todos os integrantes foram minha segunda família em Lavras e me trouxeram mais alegria no dia a dia. Em especial, agradeço à Sabrina, que além de companheira de casa e curso, se tornou minha melhor amiga.

Ao grupo “Desespero” e à toda a sua extensão, por todo apoio intelectual, companheirismo e por todos os momentos bons e ruins compartilhados durante a faculdade. Cada integrante dessa turma foi crucial para que eu pudesse finalizar minha graduação com êxito.

RESUMO

Barragem é um elemento estrutural, podendo ser constituído de concreto, de terra ou de enrocamento, com finalidades diversas, sendo as de terra, as mais utilizadas em nosso país. As principais funções de uma barragem compreendem a contenção ou acumulação de substâncias líquidas, líquidas e sólidas ou rejeitos. Além disso, é válido ressaltar que também podem ser utilizadas para aproveitamento hidrelétrico, regularização das vazões, abastecimento hídrico e irrigação. Para sua construção, antigamente eram utilizados métodos empíricos, tendo a evolução de seu processo construtivo em meados de 1940. Aproximadamente 30 anos depois, começaram a ser construídas barragens apresentando em sua constituição materiais geossintéticos. Os geossintéticos, por sua vez, são materiais geralmente poliméricos, de origem sintética ou natural, que possuem diversas atribuições, sendo as principais reforço, drenagem, filtração, estabilização de solos e impermeabilização. São denominados de acordo com suas funções e formatos. Os mais utilizados são os geotêxteis, geomantas e geogrelhas, sendo comumente empregados em obras de proteção ambiental e geotécnicas. Os geotêxteis sendo empregados como elemento de filtração, reduzem o custo com materiais e escavações, o tempo de execução da obra e podem substituir materiais granulares quando estes são de difícil obtenção. Quando empregados em barramentos com funções determinadas, alguns critérios devem ser avaliados. Para a construção segura e eficaz de uma barragem, devem ser realizados estudos de viabilidade, topográficos, hidrológicos e geológico-geotécnicos. Além disso, análises de fluxo, de estabilidade e de tensão e deformação devem ser realizadas, visando a segurança do empreendimento. A monografia em questão tem como objetivo principal descrever os processos construtivos e realizar o dimensionamento de uma barragem de terra de pequeno porte na qual será empregado um geossintético geotêxtil não tecido como material filtrante de um sistema de drenagem em substituição a materiais granulares convencionais. Após todas as análises e cálculos, foi possível concluir que o dimensionamento e escolha do geossintético foram satisfatórios, garantindo a segurança necessária à estrutura.

Palavras-chave: Barragem. Geossintético. Geotêxtil. Filtro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipo de material das barragens registradas no ano de 2021.....	14
Figura 2 - Barragem de terra homogênea.	15
Figura 3 - Principais elementos de uma barragem de terra.	15
Figura 4 – Representação da altura final de uma barragem.....	16
Figura 5 – Representação da crista de uma barragem.	17
Figura 6 – Inclinação dos taludes.	18
Figura 7– Largura da base da seção transversal.	18
Figura 8 - Geometria do canal trapezoidal.....	19
Figura 9 – Dissipador de energia constituído de enrocamento.....	22
Figura 10 - Tipos de geossintéticos.	24
Figura 11 - Principais funções dos geossintéticos em barragens de terra.....	25
Figura 12 – Principais elementos de drenagem de uma barragem de terra.	26
Figura 13 - Filtro chaminé e suas incógnitas para dimensionamento.....	27
Figura 14 - Manta Geotêxtil MacTex®.	28
Figura 15 - Filtro geotêxtil.....	29
Figura 14 - Representação de fluxo bidimensional.	31
Figura 15 - Talude dividido em fatias.....	33
Figura 16 - Esquema de forças nas fatias	34
Figura 17 - Geotêxtil MacTex® H 40.2.	38
Figura 18 - Curva granulométrica de um solo argiloso.	39
Figura 19 - Seção transversal da barragem.....	48
Figura 20 - Vazões que passam pelo maciço e pela fundação.....	49
Figura 21 - Geometria final do filtro chaminé e do dreno de pé.	49
Figura 22- Locação do geotêxtil no filtro.	50
Figura 23 - Pedra utilizada como suporte do geotêxtil.	50
Figura 24 - Dimensionamento do extravasor.....	51
Figura 25 - Representação esquemática da tomada d'água e desarenador.....	52
Figura 26 - Locação do barramento e de suas estruturas hidráulicas.	53
Figura 27 - Linhas de fluxo e equipotenciais.....	54
Figura 28 - Resultado da análise em regime permanente.	54
Figura 29 - Resumo dos estágios da análise em regime transiente.	54
Figura 30 – FS para jusante no final da construção.....	55
Figura 31 – FS para montante no final da construção.	55

Figura 32 - Gráfico de sensibilidade para final de construção à jusante.	56
Figura 33 – Gráfico de sensibilidade para final de construção à montante.	57
Figura 34 - FS à jusante para barragem em funcionamento.	57
Figura 35 - Gráfico de sensibilidade durante operação à jusante.	58
Figura 36 - FS para o décimo dia de rebaixamento, à montante.	59
Figura 37 - Gráfico de sensibilidade para rebaixamento rápido à montante.	59
Figura 38 - FS para jusante considerando análise sísmica.	60
Figura 39 - FS para montante considerando análise sísmica.	60
Figura 40 - Gráfico de sensibilidade para análise sísmica à jusante.....	61
Figura 41 - Gráfico de sensibilidade para análise sísmica à montante.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de permeabilidade de solos sedimentares.	31
Tabela 2 - Coeficientes de segurança em situações críticas..	32
Tabela 3 - Equações x Incógnitas das forças na fatia.	34
Tabela 4 - Considerações utilizadas nos métodos.	35
Tabela 5 - Propriedades do Geotêxil não tecido MacTex® H 40.2.....	37
Tabela 6 - Parâmetros da brita 0 adotados nas análises.....	38
Tabela 7 – Parâmetros do enrocamento adotados nas análises.....	38
Tabela 8 - Parâmetros do solo da fundação adotados nas análises.....	38
Tabela 9 - Parâmetros do solo do aterro adotados nas análises.	39
Tabela 10 - Valores mínimos da folga.....	40
Tabela 11 - Dimensões da crista em função da altura da barragem.	40
Tabela 12 - Inclinação dos taludes de acordo com o material do aterro e sua altura. ..	40
Tabela 13 - Condições de contorno e suas aplicações.	41
Tabela 14 - Valores do coeficiente A.....	41
Tabela 15 - Quadro resumo dos principais dados hidrológicos utilizados..	41
Tabela 16 – Coeficientes de rugosidade n de Manning.	42
Tabela 17 – Inclinação dos taludes de acordo com a estabilidade dos canais.....	42
Tabela 18 – Coeficientes de rugosidade C de Hazen-Williams.	43
Tabela 19 - Valores do parâmetro C	43
Tabela 20 - Parâmetros utilizados nas análises de fluxo.	44
Tabela 21 - Parâmetros utilizados na análise normal.	45
Tabela 22 – Variação dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.....	46
Tabela 23: Quadro resumo dos principais elementos dimensionados.	53
Tabela 24 - Fatores de segurança em cada dia do estágio.	59
Tabela 25 - Quadro resumo dos fatores de segurança calculados.	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Tipos de barragens	14
2.2	Principais elementos de uma barragem.....	15
2.3	Aspectos construtivos.....	15
2.3.1	Altura da barragem.....	16
2.3.2	Largura da crista.....	17
2.3.3	Inclinação dos taludes	17
2.3.4	Largura da base da seção transversal	18
2.3.5	Obras acessórias	18
2.4	Estudos de viabilidade.....	22
2.5	Estudo topográfico	22
2.6	Estudo hidrológico	23
2.7	Estudo geológico-geotécnico	23
2.8	Tratamento de fundações	23
2.9	Emprego de geossintéticos em barragens.....	23
2.10	Elementos de drenagem	25
2.10.1	Geotêxtil como filtro	28
2.11	Análise de fluxo	30
2.12	Análise da estabilidade.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Materiais.....	36
3.1.1	Filtro.....	37
3.1.2	Dreno de pé	38
3.1.3	Fundação	38
3.1.4	Aterro	39

3.2	Métodos.....	39
3.2.1	Altura da barragem.....	39
3.2.2	Largura da crista.....	40
3.2.3	Inclinação dos taludes	40
3.2.4	Largura da base da seção transversal	40
3.2.5	Elementos de drenagem	40
3.2.6	Obras acessórias	41
3.2.7	Análise de fluxo	44
3.2.8	Análise de estabilidade.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Dimensionamento da barragem.....	47
4.1.1	Altura da barragem.....	47
4.1.2	Largura da crista.....	47
4.1.3	Inclinação dos taludes	47
4.1.4	Largura da base da seção transversal	47
4.1.5	Elementos de drenagem	48
4.1.6	Obras acessórias	50
4.1.7	Local de instalação.....	52
4.1.8	Resumo dos aspectos construtivos.....	53
4.2	Análise de fluxo	54
4.2.1	Regime permanente.....	54
4.2.2	Regime transiente.....	54
4.3	Análise de estabilidade.....	55
4.3.1	Fim de construção	55
4.3.2	Durante a operação.....	57
4.3.3	Reservatório rebaixado	58
4.3.4	Solicitação sísmica.....	60

4.3.5	Resumo dos fatores de segurança perante análise normal	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1	Conclusão	63
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Nacional de Mineração (2022), uma barragem pode ser definida como um elemento estrutural construído para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas, ou de misturas de líquidos e sólidos. Segundo Marangon (2004), os principais motivos para a construção de um barramento são o aproveitamento hidrelétrico, regularização das vazões do curso d'água, abastecimento hídrico, controle de inundações e irrigação. É válido ressaltar também que a contenção de rejeitos é uma finalidade de grande importância.

As barragens são utilizadas desde a antiguidade, datando aproximadamente 4.500 anos a.C. Antigamente, suas finalidades se resumiam basicamente em abastecimento de água, controle de enchentes e irrigação, e os seus processos construtivos eram baseados no empirismo. Após a Revolução Industrial, devido ao aumento da demanda por água e energia, a necessidade da utilização das barragens se ampliou e, com isso, as técnicas construtivas também foram sendo aprimoradas.

No Brasil, as primeiras barragens foram construídas no Nordeste, ainda com fundamento empírico, no início do século XX, visando combater a seca. Em 1938 começaram a ser empregados conceitos técnicos e conhecimentos sobre mecânica dos solos nos projetos. Na década seguinte, no ano de 1947, foi inaugurada a barragem do Vigário, localizada no Rio de Janeiro, na qual foram empregados novos métodos, como a utilização de filtro vertical ou chaminé, em uma barragem de terra, evidenciando a utilização de conhecimentos teóricos. Atualmente, as barragens mais utilizadas são as de terra (MASSAD, 2010).

Artières et al. (2009) afirmam que no ano de 1970 foi construída na França a primeira barragem de terra utilizando materiais geossintéticos. Os geossintéticos são materiais ou produtos industrializados, obtidos de polímeros naturais ou sintéticos, que são utilizados combinados com o solo, rochas ou outros materiais relacionados à geotecnia. Apresentam funções variadas e são empregados em barramentos com a finalidade de filtração e drenagem, separação, reforço, proteção, controle de erosões de superfícies e impermeabilização. Os produtos típicos mais utilizados são os geotêxteis e as geomembranas.

Conforme Globa (2009), a utilização dos geossintéticos em barragens como elemento de filtração e drenagem se mostra mais viável quando não há disponibilidade o suficiente de materiais granulares, como areia, brita e pedrisco, para serem utilizados nesses elementos. Além disso, a utilização de geotêxteis como elemento de filtração possibilita a redução da espessura dos filtros, possui facilidade de instalação e rapidez no seu processo executivo, apresenta baixo

custo e fornece economias em relação a escavações e prospecções de jazidas mais distantes do local de implantação da construção, evitando também o desperdício de materiais.

De acordo com a finalidade da barragem, há diferentes graus de complexidade e estudos associados. O projeto completo de uma barragem exige estudos de vários ramos da engenharia como a hidráulica, hidrologia, geologia, mecânica dos solos e das rochas e outros, e com isso, é necessária uma equipe de engenheiros para que ocorra a execução correta. Há também fiscalizações e regras operacionais específicas a serem seguidas visando a segurança do conjunto.

Para garantir a seguridade da construção e seu bom desempenho, é imprescindível que sejam realizadas algumas análises. Para verificar se os coeficientes de segurança referentes à ruptura por cisalhamento estão dentro dos valores normativos, faz-se análises de estabilidade, considerando situações críticas, como, por exemplo, as etapas de construção e de funcionamento do barramento. A análise de fluxo engloba estudos quanto à permeabilidade do solo, fluxo em meio não saturado bem como a condutividade hidráulica destes solos. Por fim, visando a prevenção de problemas como o aparecimento de trincas e fissuras e outros danos irreversíveis, é realizada a análise tensão-deformação, que não será explorada nesse trabalho (ANA, 2016).

Como objetivo principal, o trabalho em questão irá compilar os estudos necessários para o projeto de uma barragem e descrever o dimensionamento de uma barragem de terra de pequeno porte, com a finalidade de acúmulo de água. Pelas qualidades citadas do emprego de material geossintético em um barramento, será empregado geotêxtil não tecido como material filtrante de um sistema de drenagem em substituição a materiais granulares convencionais, explicitando como garantir os critérios principais de projeto do elemento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

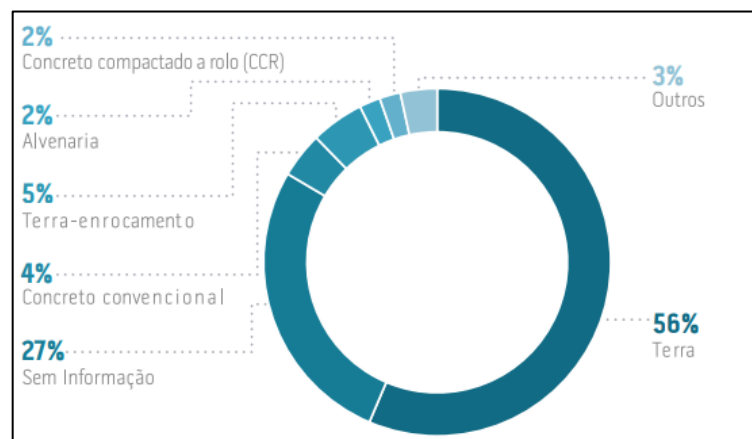
2.1 Tipos de barragens

A depender dos materiais de empréstimo disponíveis a serem empregados na construção, da geometria e do objetivo final da construção, as barragens podem ser classificadas em três tipos: barragens de concreto, de terra e de enrocamento. Há também a associação de barragens de terra e enrocamento (CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2017).

As barragens de concreto podem ser divididas em gravidade, arco ou contrafortes. As barragens de terra, podem ser de aterro homogêneo ou zoneado. As barragens de enrocamento, por sua vez, podem ser com face de concreto ou com núcleo impermeável (BARBOSA, 2016).

Como consta no Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2021), cerca de 56% das barragens do Brasil submetidas à Política Nacional de Segurança de Barragens, são constituídas de terra, conforme Figura 1.

Figura 1: Tipo de material das barragens registradas no ano de 2021.



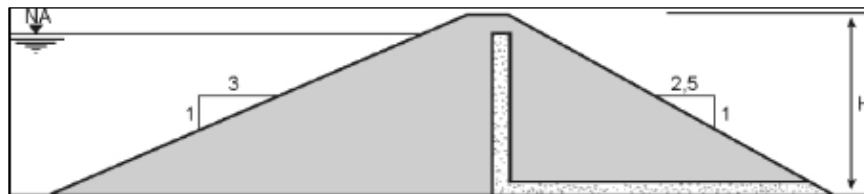
Fonte: ANA (2021).

A barragem de terra homogênea é a mais utilizada em nosso país, pois nossas condições topográficas, de fundação e de disponibilidade de materiais adequados facilitam o seu emprego. Com isso, pode ser utilizada em vários meios e possui facilidade de execução e preço reduzido comparado com outros tipos de barragem. Em sua construção são adotados materiais naturais obtidos de áreas de empréstimo próximas a obra (MASSAD, 2010).

Marangon (2005) destaca que antigamente as barragens de terra eram construídas com a finalidade de armazenamento de água para posterior irrigação e, somente a partir do ano de 1907, foram adotados métodos racionais para a execução dos projetos, possibilitando explorar mais esse tipo de construção.

As barragens de terra homogêneas (Figura 2) são constituídas por um único material. O solo em questão deve ser pouco permeável, garantindo a proteção adequada contra a água e a percolação. Para garantir a estabilidade do maciço como um todo, os taludes de jusante e de montante devem ter inclinações mais suaves (ANA, 2016).

Figura 2 - Barragem de terra homogênea.

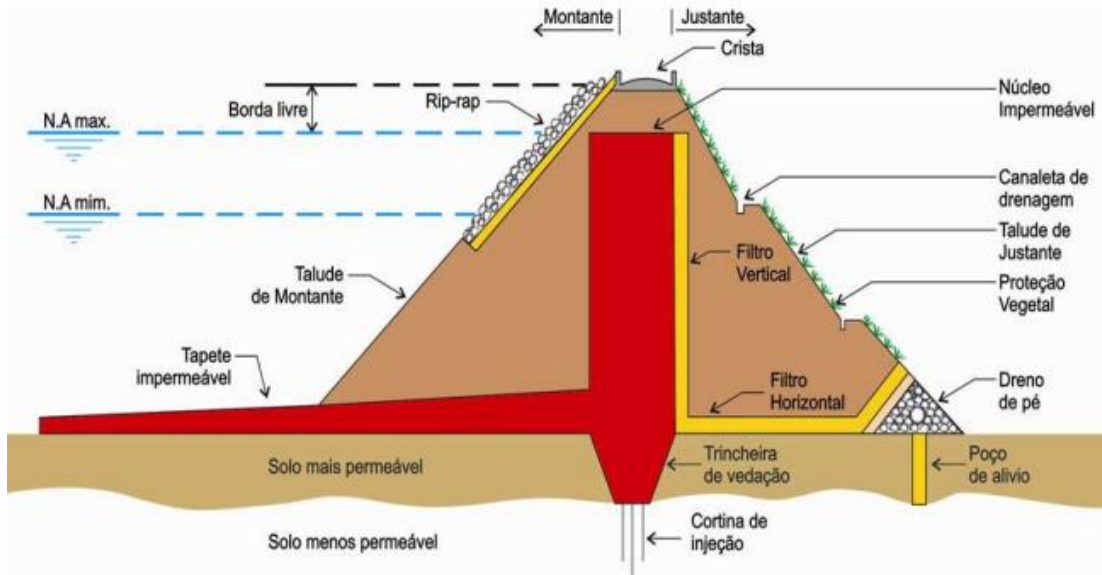


Fonte: Massad (2010).

2.2 Principais elementos de uma barragem

Segundo Carvalho (2008), os principais elementos que deve conter uma barragem de terra são: aterro, altura, borda livre, taludes, crista do aterro, espelho d'água, base, trincheira de vedação, núcleo, extravasor ou vertedouro desarenador, dreno de pé e dissipador de energia. A Figura 3 mostra a seção de uma barragem de terra e seus principais elementos.

Figura 3 - Principais elementos de uma barragem de terra.



Fonte: Carvalho (2011).

2.3 Aspectos construtivos

Os aspectos construtivos englobam os principais elementos de uma barragem de terra a serem dimensionados.

2.3.1 Altura da barragem

A partir de estudos hidrológicos e limitada por alguns fatores como a topografia do local, é dimensionada a altura da barragem, correspondendo à distância vertical entre a superfície do terreno que irá receber a barragem e a superfície de água no reservatório.

A altura total do barramento (H) depende de três fatores, sendo eles a altura normal (H_n), que é a profundidade da lâmina d'água acumulada na barragem, a altura máxima da lâmina de água no extravasor (H_e) e da folga, conhecida também como borda livre (f) (Figura 4).

Figura 4 – Representação da altura final de uma barragem.



Fonte: Adaptado de ANA (2016).

Perante o que diz Carvalho (2019), a altura total do barramento (H) pode ser determinada pela Equação 1.

$$H = H_n + H_e + f \quad (1)$$

A folga representa uma altura de segurança que é calculada prevendo as ondas que são formadas a montante da barragem. Esta folga deve representar aproximadamente 30% da altura máxima da barragem e, atualmente, seus valores mais utilizados variam entre 1,0 a 1,5 m, se tratando de pequenas barragens de terra. Além disso, ela pode ser dimensionada em função da extensão do espelho d'água e da profundidade do nível d'água (MATOS; SILVA; PRUSKI, 2013).

Ao valor da folga, deve ser somado um valor que compreende a altura de possíveis ondas a serem formadas. A altura da onda, representada por h_o , depende da maior dimensão da represa a partir da barragem (L), em km, e é determinada conforme a Equação 2.

$$h_o = 0,36 \cdot \sqrt{L} + 0,76 - 0,27 \cdot \sqrt[4]{L} \quad (2)$$

De acordo com a Eletrobrás (2003), para barragens de aterro, o valor da borda livre mínima é de 1,0 m acima do nível de máxima cheia do reservatório.

2.3.2

2.3.2 Largura da crista

A crista de uma barragem é definida como a sua parte superior horizontal, ou seja, a largura do seu topo (Figura 5). Seu dimensionamento depende de fatores como a altura do barramento, permeabilidade do aterro e se ela será destinada ou não ao trânsito. O valor mínimo adotado em projeto de barragens de terra é de 3 metros, e caso seja utilizada para o trânsito, o mínimo passa a ser de 6 metros. (CARVALHO, 2008).

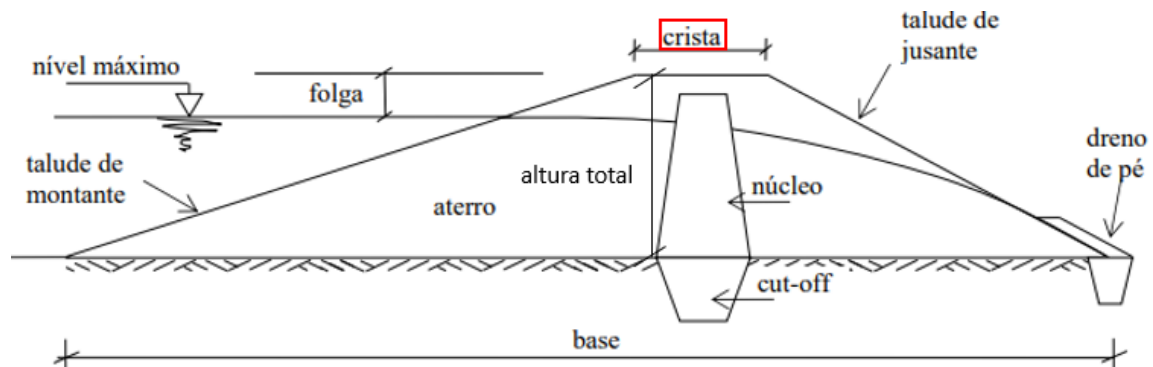
A largura da crista é determinada com base na Equação 3, proposta pelo U.S. Bureau of Reclamation (1967):

$$c = \frac{H}{5} + 3 \quad (3)$$

A incógnita c representa a largura da crista e H a altura do barramento, ambos em metros.

De acordo com a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (2016), a largura da crista não deve ser inferior a 3 metros, e de modo geral, situa-se entre 6 e 10 metros.

Figura 5 – Representação da crista de uma barragem.



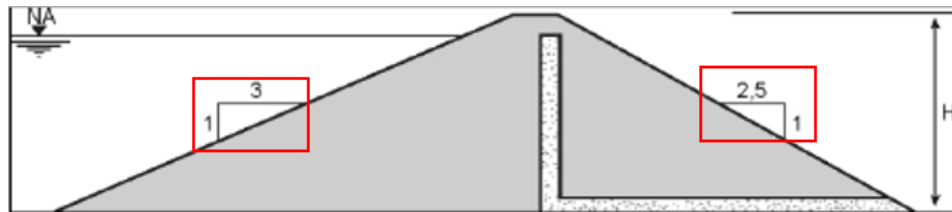
Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

2.3.3 Inclinação dos taludes

Após a determinação da largura da crista, é necessário determinar as inclinações dos taludes de montante e jusante (Figura 6). Para garantir a estabilidade do maciço, o talude de montante deve ser menos íngreme que o talude de jusante e assim ocorre também em casos de taludes constituídos de materiais que não apresentam boa qualidade.

A declividade pode ser representada pelo ângulo formado entre o talude e a horizontal ou pela relação entre a projeção horizontal e vertical (H:V), e depende de fatores como a altura da barragem e o material do aterro (MATOS; SILVA; PRUSKI, 2013).

Figura 6 – Inclinação dos taludes.



Fonte: Massad (2010).

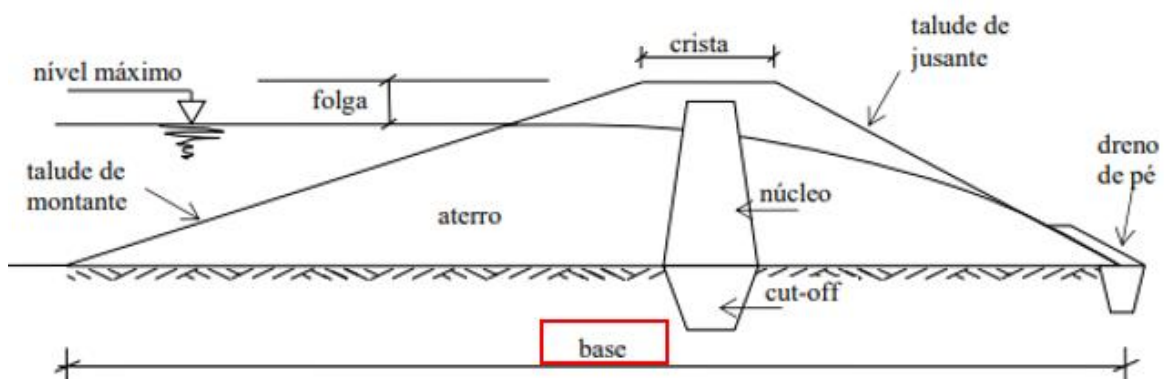
2.3.4 Largura da base da seção transversal

A largura da base da seção transversal da barragem (Figura 7) é calculada empregando a Equação 4.

$$b = c + (z_m + z_j) \cdot H \quad (4)$$

O parâmetro c representa o comprimento da crista; z_m a projeção horizontal no talude de montante; z_j a projeção horizontal do talude a jusante e H a altura do barramento, todos em metros (MATOS; SILVA; PRUSKI, 2013).

Figura 7– Largura da base da seção transversal.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

2.3.5 Obras acessórias

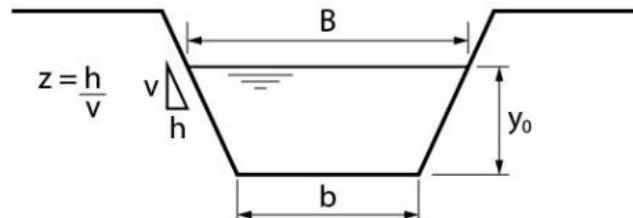
As obras acessórias, chamadas também de estruturas hidráulicas, são construídas com as finalidades de conservação, segurança, reparo e utilização da água represada (CARVALHO, 2010). São divididas em extravasor, desarenador, tomada d'água e dissipadores de energia.

2.3.5.1 Extravasor

De acordo com a ANA (2016), os extravasores possuem a função de descarga da cheia de projeto sem que ocorra transbordamento e galgamento da barragem. Para barragens de terra, a melhor opção é a utilização de vertedores naturais, que podem se localizar independentemente

do corpo do barramento (CARVALHO, 2010). A Figura 8 exemplifica a geometria de um canal trapezoidal com a função de extravasor.

Figura 8 - Geometria do canal trapezoidal.



Fonte: Guia da Engenharia (2022).

O extravasor sendo considerado um canal trapezoidal é calculado através da fórmula de Manning (CARVALHO, 2019), demonstrada pela Equação 5.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot \sqrt[3]{R^2} \cdot \sqrt{I} \quad (5)$$

Onde a vazão máxima de cheia, em m³/s é representada por Q ; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; A a área molhada em m²; R o raio hidráulico em m, e I a declividade do canal, em porcentagem.

O raio hidráulico, compreende a razão entre a área e o perímetro da área molhada (Equação 6).

$$R = \frac{A}{P} \quad (6)$$

O canal é em formato de trapézio, e a fórmula para A e P são demonstradas nas Equações 7 e 8.

$$A = (b + z \cdot h) \cdot h \quad (7)$$

$$P = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + z^2} \quad (8)$$

A incógnita b é a largura da base do canal em m, h a altura máxima de água no canal e z corresponde à inclinação dos taludes de acordo com a estabilidade do canal, sendo um valor tabelado.

2.3.5.2 Desarenador

Também denominado de descarregador de fundo, o desarenador é utilizado para eliminar sedimentos finos depositados no fundo, permitir o esvaziamento da represa e também

o alívio em ocasiões de cheia (CARVALHO, 2010). Em barragens de terra podem ser túneis escavados no próprio maciço da fundação ou em suas margens, ou condutos instalados também no maciço da fundação (ANA, 2016).

Para o dimensionamento do desarenador, é utilizada a fórmula de Hazen-Williams para condutos forçados (MATOS; SILVA; PRUSKI, 2013), descrita abaixo pela Equação 9.

$$D = \left(\frac{Q}{0,279 \cdot C \cdot J^{0,54}} \right)^{0,38} \quad (9)$$

D é o diâmetro da tubulação, em m; Q corresponde à vazão escoada, em m³/s, e no caso do desarenador, utiliza-se a vazão de esvaziamento Q_e ; C é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams e J a perda de carga unitária, em m/m, sendo descrita como consta na Equação 10.

$$J = \frac{H_d}{2 \cdot b} \quad (10)$$

H_d diz respeito à altura de lâmina d'água acima do desarenador e b é a base do barramento. Após encontrar a perda de carga unitária, o próximo passo é encontrar a vazão de esvaziamento, com auxílio da Equação 11.

$$Q_e = \frac{Vol_{ac}}{T} + Q_n \quad (11)$$

Q_e é a vazão de esvaziamento, dada em m³/s; Vol_{ac} corresponde ao volume acumulado acima do desarenador, em m; T é o tempo para esvaziamento da represa, dado em segundos e Q_n , que é a vazão média em m³/s

Para a estimativa de vazão do projeto, geralmente é utilizado o método racional. Esse método é aplicado para bacias com área de até 200 hectares (Equação 12).

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} \quad (12)$$

Q é a vazão máxima de escoamento superficial, dada em m³/s; C o coeficiente de escoamento superficial; i a intensidade média máxima de precipitação, em mm/h e A a área da bacia de drenagem em há. A Equação 13 descreve como encontrar a intensidade média máxima de precipitação.

$$i = \frac{k \cdot T^a}{(b + t)^c} \quad (13)$$

T é o tempo de retorno, em anos e t o tempo de duração da precipitação, em minutos. k , a , b , e c são parâmetros da equação que variam conforme a região analisada.

2.3.5.3 Tomada d'água

Para ser possível captar a água represada e transportar o volume de água para jusante para o seu aproveitamento, é construída a tomada d'água. Ela pode ser construída tanto acima da cota máxima do reservatório quanto no fundo, dependendo das condições do local e de sua finalidade. Na maioria dos casos, possuem válvulas, divisórias ou grelhas, para proteção contra peixes. Para barragens de aterro, geralmente é construída separada do corpo do barramento (RIJO, 2007).

A tomada d'água também é dimensionada a partir da equação de Hazen-Williams, conforme Equação 14.

$$D = \left(\frac{10,641 \cdot Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot J} \right)^{\frac{1}{4,87}} \quad (14)$$

As incógnitas D , Q e C são as mesmas descritas no tópico 2.3.5.2, com os mesmos valores, porém, J apresenta diferenças. A perda de carga unitária, J , é definida pela Equação 15.

$$J = \frac{H}{L} \quad (15)$$

H corresponde à diferença de altura entre as cotas do nível de água no reservatório e do local de saída de água da tubulação e L o comprimento total da tubulação.

2.3.5.4 Dissipadores de energia

Com a função de dissipar o excesso de energia cinética do fluxo, são construídos os dissipadores de energia. Essas estruturas reduzem a velocidade de escoamento da água, evitando danos ao canal. Podem ser compostos por ressalto hidráulico, do tipo impacto, rampa com blocos, escada dissipadora ou enrocamento, como exemplificado na Figura 9 (CARVALHO, 2010).

Figura 9 – Dissipador de energia constituído de enrocamento.



Fonte: Athos Engenharia e Construção (2023).

2.4 Estudos de viabilidade

Os estudos de viabilidade são realizados no âmbito técnico, econômico, ambiental, hidrológico, geológicos e geotécnicos. Somente a partir desses estudos preliminares que é possível avaliar se é vantajosa ou não a construção do barramento, bem como o tipo da barragem e o seu local de construção (ARAÚJO, 2021).

É avaliado se o custo final do produto se enquadra no que foi pré-estabelecido. O orçamento inclui custos como o de projeto, de construção, de desapropriação e de despesas diretas e indiretas. Esse estudo faz parte do projeto básico, juntamente com especificações técnicas, desenhos, planilha de quantitativos e outros documentos que dão suporte para o desenvolvimento do projeto (GAIOTO, 1982).

2.5 Estudo topográfico

A topografia da região escolhida para a construção do barramento pode indicar a escolha inicial do tipo de barragem, pois é necessária a concordância da barragem com as condições naturais do entorno para garantir a segurança do projeto como um todo, minimizando as ligações entre as estruturas, possibilitando o maior aproveitamento delas e diminuindo custos com escavações (ANA, 2016).

Para isso, é imprescindível um levantamento planialtimétrico do terreno em análise, pois a partir dele é possível definir alguns elementos básicos para o projeto final. Um exemplo deles são o nível máximo do reservatório, a área total a ser inundada, cota máxima da crista, posicionamento de estruturas como o vertedouro, maciço e extravasor, interferência da vegetação no empreendimento e o volume de terra do maciço (GOMES; TEIXEIRA, 2017).

2.6 Estudo hidrológico

Os estudos hidrológicos devem englobar toda a bacia de contribuição e os tempos de recorrência para as vazões máximas, médias e mínimas ao longo de toda a vida útil da estrutura (QUEIROZ, 2016).

Também são importantes informações a respeito de hidrogramas das cheias naturais e modificadas; curvas de vazões nas seções de restituições; volume de sedimentos afluentes ao reservatório; características fisiográficas, climáticas e de cobertura vegetal no entorno da bacia hidrográfica estudada, dados sobre as precipitações anuais e mensais do local e qualidade da água.

Além disso, os estudos hidrológicos devem ser avaliados por modelos hidrodinâmicos, como por exemplo o Dam Break, prevendo as consequências que uma possível ruptura da barragem causaria, permitindo que seja possível classificar corretamente o dano potencial associado da estrutura (ANA, 2016).

2.7 Estudo geológico-geotécnico

As investigações geológicas correspondem ao mapeamento de superfícies e sondagens mecânicas, que podem ser de percussão, rotativa e por trado. São contempladas por poços, galerias, amostragens especiais, ensaios *in-situ* e laboratoriais (ELETROBRÁS, 2003).

Conforme a Agência Nacional das Águas (ANA, 2016), o programa de investigações geológico-geotécnicas engloba também a realização de ensaios de geofísica.

2.8 Tratamento de fundações

Os materiais que constituem um barramento podem ser controlados e especificados, o que caracteriza a barragem como uma construção artificial. Porém, sobre a fundação, não é possível ter tanto controle.

Para minimizar os problemas oriundos dessa falta de controle, é possível realizar tratamento nas fundações e melhorar suas características, como por exemplo o controle da percolação. Dentre os tratamentos existentes, há cinco mais utilizados, sendo eles: retirada do material superficial, trincheira de vedação, diafragma, tapetes e injeções (MASSAD, 2010).

2.9 Emprego de geossintéticos em barragens

Como cita a NBR ISO 10318 (ABNT, 2013), os geossintéticos são materiais constituídos em sua maior parte por polímeros, sendo eles sintéticos, oriundos do petróleo ou naturais. São comumente utilizados em obras geotécnicas e de proteção ambiental. Dente suas

principais funções, são listadas o reforço, filtração, drenagem, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial.

Há uma grande variedade desses produtos, e suas principais denominações, que variam basicamente de acordo com seu formato e função, são: geotêxtil, geogrelhas, biomantas, geomantas, geomembranas, georredes, geocompostos e geofomas (PALMEIRA, 2018). A Figura 10 exemplifica algum deles.

Figura 10 - Tipos de geossintéticos.

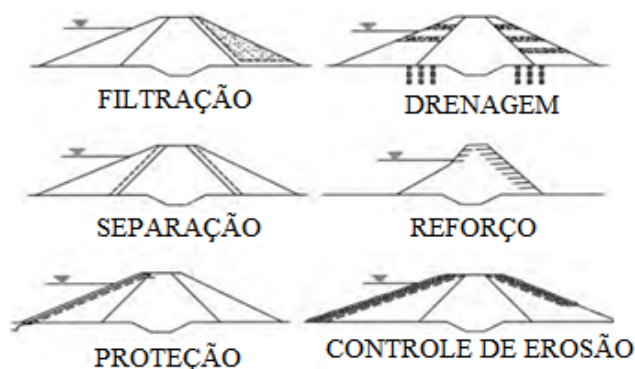


Fonte: Engenharia 360 (2022).

Embora o desenvolvimento de alguns polímeros tenha ocorrido aproximadamente na década de 1910, somente em 1970 os geossintéticos tiveram maior destaque e começaram a ser utilizados também na construção de barragens dentro da Engenharia Civil. No Brasil, começou a ser mais empregado no ano de 1990. A primeira barragem de terra construída utilizando materiais geossintéticos foi na França, onde o emprego do geotêxtil se deu como filtro, na encosta à jusante, ao redor dos drenos principais e à montante como elemento de separação entre o enrocamento e o solo (VERTEMATTI, 2015).

De acordo com Globa (2009), a princípio, os geossintéticos têm sido usados para reparar barragens já existentes, onde seja necessária construção rápida devido a fatores relacionados a segurança do barramento. A utilização desse polímero se tornou mais viável também na substituição de materiais granulares, quando não há disponibilidade suficiente. Associados a barragens, suas aplicações são principalmente em filtração, drenagem, separação, reforço, proteção e controle de erosão superficial. A Figura 11 ilustra essas funções na sequência em que foram citadas.

Figura 11 - Principais funções dos geossintéticos em barragens de terra.



Fonte: Adaptado de Globa (2009).

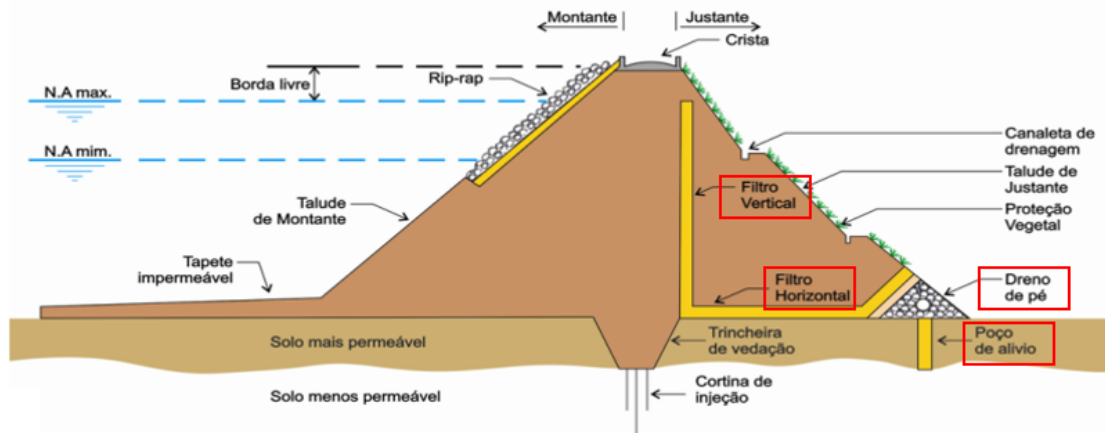
2.10 Elementos de drenagem

De acordo com Cruz (1996), dentro do dimensionamento e da verificação de segurança de uma barragem, o controle do fluxo pelo maciço, fundação e ombreiras são essenciais para garantir a segurança do empreendimento. A partir do estudo da percolação da água por esses locais, é possível obter os dados necessários para os cálculos corretos do sistema de drenagem interna, da fundação e do sistema de vedação.

A infiltração, caracterizada pelo movimento de água em direção ao talude de jusante, deve ser controlada para que o fluxo não aflore à superfície à jusante de maneira errônea. Caso isso ocorra, pode desencadear processos erosivos, carreamento de partículas e aumento de pressões intersticiais, comprometendo o pleno funcionamento da estrutura. Para que a estabilidade da obra aumente, é necessário inserir elementos de drenagem no barramento, para que o fluido caminhe pelo local adequado (ANA, 2016).

Os principais dispositivos de drenagem de uma barragem de terra são: filtro chaminé; tapete drenante; dreno de pé; trincheira drenante e poços de alívio (Figura 12). O filtro em chaminé (vertical ou inclinado), possui a função de interceptar a percolação através da barragem. O tapete drenante, além de conduzir para jusante as águas oriundas do filtro chaminé, também tende a controlar as águas que percolam através da fundação. O dreno de pé serve como uma continuidade ao tapete drenante, servindo também como uma segurança adicional contra processos erosivos. A trincheira drenante tem a finalidade de interceptar fluxos provenientes das camadas permeáveis mais superficiais da fundação. Por fim, os poços de alívio também atuam na fundação, tendo a função de reduzir as subpressões oriundas da percolação de água em estratos permeáveis (GAIOTO, 2003).

Figura 12 – Principais elementos de drenagem de uma barragem de terra.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Para a realização do projeto dos dispositivos de drenagem interna, é essencial a análise de percolação, tendo como base modelos hidrogeotécnicos e prevendo distribuição de pressões e o valor de vazões do maciço e na fundação. A concepção do modelo hidrogeotécnico depende basicamente da identificação e distribuição dos materiais no maciço e definição dos parâmetros hidrogeotécnicos (ELETROBRÁS, 2003).

Ao dimensionar o filtro contendo materiais com transição granulométrica, alguns critérios devem ser seguidos, principalmente no que se refere a granulometria do solo utilizado. Dentre os principais, temos que o filtro deverá ser mais permeável que o solo a ser protegido, permitindo que o material sólido fique retido, que a água possa percolar de maneira fácil e que os vazios presentes não permitam a passagem de grãos do solo fino.

Para que ocorra a drenagem de maneira adequada e a proteção dos elementos drenantes, são construídas camadas de transição das quais se utilizam materiais com transição granulométrica. De acordo com o que Terzaghi concluiu em 1922 e que é empregado até os dias atuais, para garantir uma relação adequada de permeabilidade e de estabilidade, a relação entre o diâmetro do filtro e o diâmetro do material de base deve obedecer às Equações 16 e 17, onde d_{15} e d_{85} referem ao material de base e D_{15} ao material do filtro (PINTO, 2006).

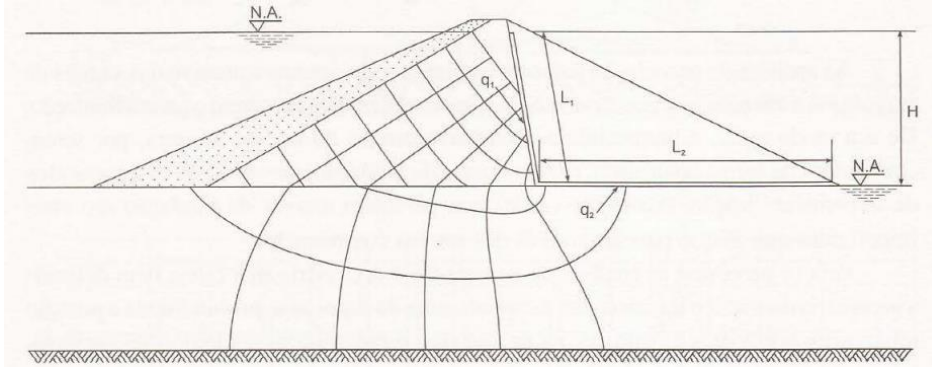
$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 5 \quad (16)$$

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5 \quad (17)$$

Além disso, ressalta-se que a curva granulométrica do filtro deve ser similar à curva granulométrica do solo protegido, que o filtro não pode ter mais de 5% dos grãos passando na

peneira de diâmetro 0,075 mm e que caso o solo seja majoritariamente pedregulhoso, o filtro deve ser projetado com base na porção de solo mais fino que a peneira de 25,4 mm (GAIOTO, 1982). A Figura 13 exemplifica o filtro chaminé, que será empregado no projeto.

Figura 13 - Filtro chaminé e suas incógnitas para dimensionamento.



Fonte: Gaioto (2003).

A parte do filtro composta por material granular engloba algumas equações. A espessura do filtro em chaminé, denominado de A_1 , é calculada por meio da fórmula de Darcy, de acordo com a Equação 18.

$$A_1 = 10 \cdot \frac{q_1 \cdot L_1}{k_{f1} \cdot H} \quad (18)$$

A vazão que chega ao filtro através do maciço da barragem é denominada de q_1 , L_1 é o comprimento vertical do filtro, k_{f1} o coeficiente de permeabilidade do material em que ele será constituído e por fim, H diz respeito a carga hidráulica do reservatório. O valor encontrado para A_1 deverá ser multiplicado por um fator de segurança, sendo em geral, o valor de 10, visando a diminuir as incertezas oriundas da permeabilidade, que variam em escala logarítmica.

A parte filtrante disposta na horizontal, que corresponde ao tapete drenante ou filtro horizontal, segue a mesma analogia, seguindo a lei de Darcy. Dessa vez, são somadas as vazões que chegam ao tapete através do filtro em chaminé e da fundação. Dessa maneira, têm-se para a espessura do tapete drenante, A_2 , o que segue na Equação 19:

$$A_2 = 10 \cdot \frac{(q_1 + q_2) \cdot L_2}{\Delta h \cdot k_{f2}} \quad (19)$$

A vazão que chega através da fundação é o q_2 , L_2 é o comprimento horizontal do tapete, Δh a carga hidráulica na extremidade a montante e k_{f2} o coeficiente de permeabilidade em que será constituído. Também deve-se multiplicar o resultado por um fator de segurança da ordem de 10 (GAIOTO, 2003).

Além do filtro chaminé, há também o dreno de pé. De acordo com Mello (1983), o recomendado é que o dreno de pé tenha no mínimo duas vezes a espessura do dreno horizontal de altura e que sua crista tenha no mínimo 4,00 m. A Eletrobrás (2003) impõe que a largura mínima para o elemento é de 0,40 m.

2.10.1 Geotêxtil como filtro

No Brasil, as primeiras utilizações de geossintéticos tiveram como finalidade a atuação do elemento como filtro e, até hoje, essa permanece sendo uma das principais funções empregadas pelo material em nosso país. Dentro da barragem, ele irá funcionar como filtro de um sistema drenante, agindo de maneira similar a filtros compostos por materiais de diferentes granulometrias, devendo permitir a máxima vazão do fluido e evitando o carreamento de partículas (BEIRIGO, 2005).

O material polimérico pode ser utilizado tanto na construção de um novo barramento quanto na reabilitação de barragens antigas. O produto utilizado é o geotêxtil, que se trata de um produto têxtil e permeável, podendo ser classificado como geotêxtil tecido e não tecido, a depender de como ocorreu seu processo de manufatura (BARBOSA, 2016). Seus filamentos podem ser contínuos ou não, dispostos no formato de manta. A Figura 14 ilustra uma manta geotêxtil não tecido.

Figura 14 - Manta Geotêxtil MacTex®.



Fonte: Maccaferri Brasil (2022).

Os geotêxteis mais utilizados em barragens são os não tecidos, sendo constituídos por filamentos dispostos de forma aleatória. Por influenciarem diretamente seu comportamento hidráulico, suas propriedades estruturais devem ser avaliadas, tais como: gramatura, que representa a massa por unidade de área do material; espessura, que diz respeito à distância entre as duas faces da manta do geotêxtil quando submetidos a uma certa tensão, e porometria, que envolve a porosidade e tamanho das constrições.

Para garantir bom desempenho na filtração e drenagem, é importante que o solo a receber proteção possua uma distribuição de suas partículas mais uniforme e garantir que haja

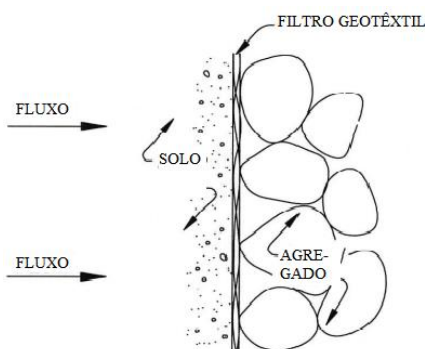
uma boa interação entre as partículas e o geotêxtil, evitando que ocorra cegamento, bloqueamento ou colmatação do material (BEIRIGO, 2005).

Há também diversos ensaios laboratoriais responsáveis por avaliar o conjunto solo e geotêxtil quanto às condições de percolação, aliadas à colmatação e capacidade de retenção, e o mais utilizado é o ensaio de filtração do tipo razão entre gradientes (GR). Avaliar a variação da vazão e a condutividade hidráulica são atividades complementares ao ensaio GR que garantem a boa escolha do filtro sintético (PALMEIRA; GARDONI, 2000).

O uso de geotêxteis como material filtrante não é recomendado em alguns casos, como por exemplo na filtragem crítica. Essa situação é definida quando o filtro é o único elemento atuante na defesa e proteção dos taludes e contra a erosão interna advinda da fundação (FEMA, 2008), contexto que não se enquadra no trabalho em questão.

Comparado com os filtros de materiais granulares, as vantagens dos filtros têxteis são: redução da espessura do filtro, características controladas e regulares devido ao seu processo de fabricação, facilidade de instalação, baixo custo e continuidade de estrutura filtrante. Além dessas vantagens, pode-se citar também a escavação reduzida e menor desperdício de materiais (VERTEMATTI, 2015). A Figura 15 representa como é a utilização do geotêxtil como filtro.

Figura 15 - Filtro geotêxtil



Fonte: Adaptado de Gobla (2008).

Cabe salientar que há critérios que são levados em consideração para o dimensionando de filtros têxteis, sendo eles os de retenção.

A capacidade de retenção do filtro engloba a abertura de filtração do geotêxtil (O_{95}) com o valor do diâmetro equivalente do solo (d_{85}), sendo necessário que 85% de todas as partículas sejam inferiores ao d_{85} . Relacionam-se também as condições de contorno do meio e a destinação do geotêxtil. O critério de retenção é avaliado segundo a Equação 20.

$$O_{95} < C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot d_{85} \quad (20)$$

C_1 corresponde ao coeficiente relativo à granulometria do solo; C_2 é o coeficiente que relaciona a densidade do solo; C_3 é o coeficiente relativo ao gradiente hidráulico e C_4 é o coeficiente que relaciona a função do geotêxtil (ANDREATI; SENA, 2015).

O critério de permeabilidade relaciona o coeficiente de permeabilidade do solo base, k_s , um coeficiente adimensional, A , e k_n , coeficiente de permeabilidade normal do geotêxtil, conforme Equação 21 (MUÑOZ, 2005).

$$k_n > A \cdot k_s \quad (21)$$

De acordo com a Maccaferri Brasil (2022), no critério de sobrevivência há seis aspectos devem ser avaliados, garantindo que o geossintético será capaz de suportar por si só alguns esforços aos quais possa estar submetido. São eles a resistência a perfurações dinâmicas; energia de deformação absorvida; flexibilidade; resistência à passagem de água; sensibilidade aos solos finos em suspensão e resistência à agressividade do meio ambiente. Duas normas estabelecem os níveis de solicitação que o geossintético deve atender, sendo elas a NBR ISSO 12236 (ABNT, 2013) e NBR ISSO 10319 (ABNT, 2013).

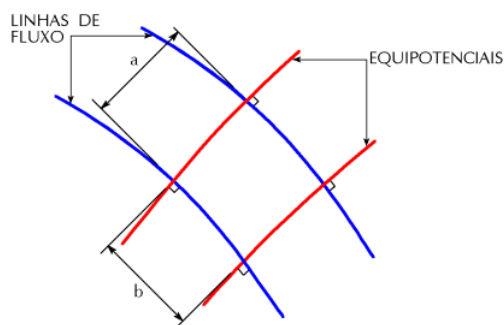
2.11 Análise de fluxo

De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens da Agência Nacional das Águas (ANA, 2018), as principais causas de acidentes em barragens são oriundas do galgamento e do piping. O galgamento é a passagem da água por cima da barragem, podendo erodir o talude e/ou a fundação. O piping corresponde a erosão interna causada pelo arrastamento dos materiais do aterro ou da fundação pela água.

O conhecimento de alguns conceitos é imprescindível para o correto entendimento da análise de fluxo, como por exemplo os relacionados às cargas hidráulica, piezométrica e altimétrica (MARANGON, 2018).

Na prática, o estudo para barragens compreende no fluxo bidimensional, onde a água segue caminhos contidos em planos paralelos, denominados como redes de fluxo. O caminho que a água percorre é denominado de linha de fluxo e locais que possuem a mesma carga hidráulica total compreendem as linhas equipotenciais. Para satisfazer as condições de contorno desse problema, segue-se a teoria de Laplace, que diz que as linhas de fluxo devem ser ortogonais às linhas equipotenciais (GERSCOVICH, 2011). O fluxo bidimensional pode ser estudado analisando um permeâmetro curvo (Figura 16).

Figura 16 - Representação de fluxo bidimensional.



Fonte: Adaptado de Viana (2016).

Algumas premissas devem ser seguidas para o traçado de uma rede de fluxo manual (VIANA, 2016), porém, como em barragens de terra o fluxo é não-confinado, onde não é possível conhecer todas as condições de contorno necessárias, o traçado manual se torna complexo. Hoje em dia, com o avanço da tecnologia, a construção gráfica se dá por softwares (PINTO, 2006).

Os estudos da percolação através do maciço e da fundação são essenciais para os estudos de estabilidade e dimensionamento de sistema de drenagem, analisando a distribuição de pressões e o valor das vazões (ELETROBRÁS, 2003).

Ao realizar a análise de fluxo é imprescindível que seja reconhecida a permeabilidade do material utilizado no maciço do barramento. A permeabilidade é a capacidade que o meio proporciona a passagem de um fluido entre os poros vazios existentes, indo do ponto de maior energia para o ponto de menor energia, ocorrendo em meio poroso (MENEZES, 2019). A Tabela 1 mostra os valores dos coeficientes de permeabilidade de solos sedimentares.

Tabela 1 - Coeficiente de permeabilidade de solos sedimentares.

Solo	k (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

De acordo com Lima (2014), em laboratório, é possível estimar a permeabilidade dos solos por meio de dois métodos. Para solos granulares, é utilizado o teste de carga hidráulica constante, normatizado pela NBR 13292 – “Solos – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante” (ABNT, 2021). Tanto para solos

granulares quanto para os finos, pode ser utilizado o teste com carga hidráulica decrescente, assegurados pela NBR 14545 – “Solos – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável”. Ambos os métodos são utilizados no estudo de fluxos unidimensionais, onde a percolação ocorre somente em uma direção (ABNT, 2021).

2.12 Análise da estabilidade

Para o dimensionamento de uma barragem, é imprescindível que seja realizada a análise de estabilidade dos taludes. Sua finalidade é validar o pré-projeto e a geometria inicial dimensionada, aliada às análises de fluxo e de tensão e deformação. Com os resultados obtidos, é possível verificar se os coeficientes de segurança encontrados estão dentro dos valores mínimos adotados como critérios de projeto (CAPUTO; CAPUTO, 2015).

Uma barragem está sujeita a vários esforços, forças e momentos, tanto verticais quanto horizontais, e estes são responsáveis por originar movimentos de massa de terra que recebem o nome de escorregamentos e que culminam para a instabilidade do maciço como um todo.

O fator de segurança é o quociente entre a resistência ao cisalhamento do solo e a tensão de cisalhamento requerida para o equilíbrio. Para fatores de segurança menor que 1, não há significado físico, maior que 1 apresenta um talude estável e igual a 1, representa que o maciço se encontra no limite do seu equilíbrio (ANDRADE; FILHO, 2015).

Há 4 situações hipotéticas que são consideradas as mais críticas para as quais requerem a análise de estabilidade dos taludes, tanto de jusante quanto de montante. Deve-se analisar a barragem no período relativo ao final de construção, em regime permanente operando com o seu nível de água máximo, considerando abaixamento rápido do nível de água e sob a ação de sismos (ELETROBRÁS, 2003).

Na Tabela 2 são apresentados os fatores de segurança mínimo adotados para as barragens de terra e enrocamento para a acumulação de água.

Tabela 2 - Coeficientes de segurança em situações críticas. Continua.

Situação	Coeficiente de segurança	Talude
<i>Fim de construção</i> Reservatório vazio	1,3	Montante e Jusante
<i>Durante a operação</i> Reservatório cheio	1,5	Jusante

Fonte: Adaptado de Guidicini & Sandroni (2022).

Tabela 2 - Coeficientes de segurança em situações críticas. Conclusão.

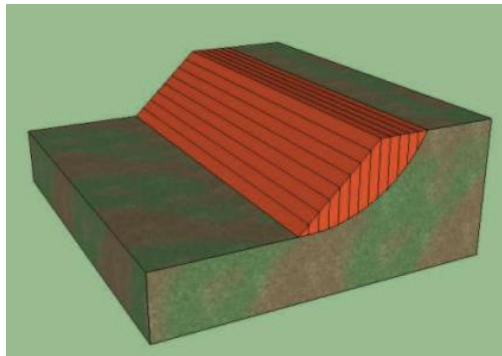
Situação	Coeficiente de segurança	Talude
<i>Perante rebaixamento rápido</i>		
Reservatório rebaixado	1,3	Montante
<i>Solicitação sísmica</i>		
Reservatório cheio	1,1	Montante e Jusante

Fonte: Adaptado de Guidicini & Sandroni (2022).

Segundo Massad (2010), para a análise de estabilidade de taludes, atualmente são utilizados métodos que se baseiam na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo na iminência de entrar em um processo de escorregamento, o que resulta na denominação de métodos do equilíbrio limite (MEL). Esse método segue alguns pressupostos, sendo eles: o solo se comporta como material rígido-plástico; as equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura e o coeficiente de segurança é constante ao longo da linha de ruptura.

O método geral, método das fatias e o método das cunhas englobam a teoria do equilíbrio limite, mas o foco se dá no método das fatias, por ser o mais utilizado em estudos de estabilidade (Figura 17). Uma de suas vantagens é o fato de não apresentar restrições quanto ao tipo do solo, geometria do talude e tipo de análise (GERGOSVICH, 2012).

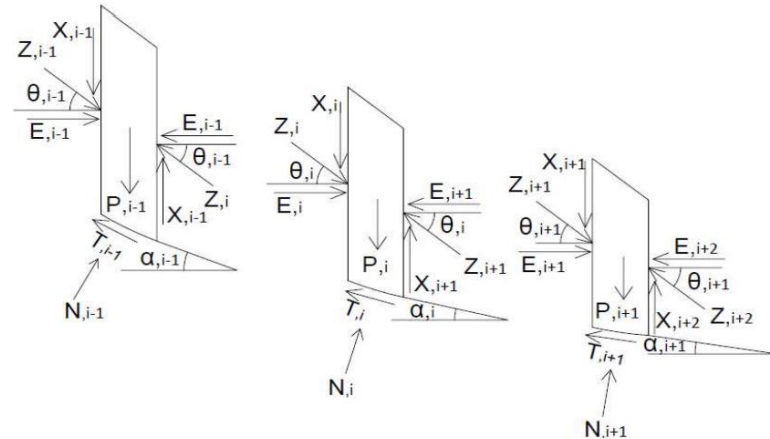
Figura 17 - Talude dividido em fatias.



Fonte: Silva (2011).

O método das fatias é resumido em 3 etapas principais, sendo elas: divisão do talude em fatias, garantindo que a base seja linear, que sejam do mesmo material e que não apresentem discontinuidades no topo; execução do equilíbrio de forças em cada fatia (Figura 18), onde as tensões normais são geradas pelo próprio solo constituinte de cada parte, e por último, a realização do cálculo das equações de momentos do equilíbrio do arranjo, considerando o centro do círculo como referência e também os pesos e forças tangenciais na base das fatias (SOBRINHO, 2015).

Figura 18 - Esquema de forças nas fatias



Fonte: Sobrinho (2015).

Solucionando em conjunto o somatório de forças e/ou momentos através das equações da estática, o resultado origina um problema estaticamente indeterminado, onde o número de incógnitas é maior que o de equações. Com isso, há a necessidade da utilização de hipóteses simplificadoras, visando diminuir o número de incógnitas (SOBRINHO, 2015). Para tornar o problema estaticamente determinado, foram introduzidas hipóteses a respeito das forças entre as lamelas, denominadas de X e E, e a diferença entre as hipóteses resultou em diversos métodos (GERGOSVICH, 2012). A Tabela 3 contém a relação entre equações e incógnitas.

Tabela 3 - Equações x Incógnitas das forças na fatia.

Equações	Tipo de equação
2n	Equilíbrio de forças
n	Equilíbrio de momentos
n	Envoltória de resistência
4n	TOTAL DE EQUAÇÕES
Incógnitas	Tipo de variável
1	Fator de segurança
n	Força tangencial na base da fatia
n	Força normal na base da fatia
n	Localização de N' na base da fatia
n-1	Força tangencial entre fatias
n-1	Força normal entre fatias
n-1	Ponto de aplicação da força entre fatias
6n-2	TOTAL DE INCÓGNITAS

Fonte: Adaptado de Gergosvich (2012).

Com o aprimoramento dos conhecimentos técnicos a respeito do assunto, o primeiro método criado para solucionar a incógnita foi desenvolvido por Fellenius em 1936, e ficou

conhecido como Método Sueco. Após isso, surgiram outros métodos, sendo os principais deles os de Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Correia (1988), entre outros. O que difere a abordagem entre um método e outro são nas equações da estática que são satisfeitas, nas forças entre as fatias e na distribuição delas, conforme é exposto na Tabela 4. Para o valor final do fator de segurança, todas as soluções são encontradas por meio de um processo de iteração (RODRIGUES, 2022).

Tabela 4 - Considerações utilizadas nos métodos.

Método	Superfície de deslizamento	Equilíbrio de força		Equilíbrio de momento	Compo-Compo-nente E nente X		Força entre fatias Z
		ΣF_h	ΣF_v				
Fellenius	Circular	Não	Não	Sim	Não	Não	Não existe
Bishop simplificado	Circular	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Horizontal
Janbu simplificado	Plana	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Horizontal
Spencer	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
Morgenstern e Price	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

Fonte: Adaptado de Sobrinho (2015).

Os métodos que podem ser empregados em qualquer superfície de deslizamento são os de Spencer, Morgenstern e Price e Janbu Rigoroso. O método de Spencer é considerado rigoroso. Ele satisfaz todas as equações de equilíbrio e considera as forças de corte e normais constantes. De maneira bem simplista, o método de Morgenstern e Price, também considerado rigoroso, cumpre todas as condições de equilíbrio (SILVA, 2011). Ambos serão utilizados na análise de estabilidade dos taludes da barragem dimensionada.

Além disso, é comum empregar nas análises de estabilidade, a análise de sensibilidade. O conceito de análise de sensibilidade diz respeito às análises que são capazes de determinar qual a contribuição individual das variáveis de entrada de um problema sobre sua variável resposta (HELTON et al., 2006). Na estabilidade de taludes, essa técnica pode ser aplicada variando em intervalos os parâmetros de resistência solo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

É importante salientar que o trabalho em questão tem caráter puramente didático e não ocorrerá a execução do projeto elaborado. Com isso, por se tratar de um projeto fictício, não serão realizados os ensaios necessários de campo e de laboratório referentes ao local de implantação da estrutura. Além disso, por falta de recursos, não seria possível realizar campanhas de sondagens nos solos, rochas e prospecções de jazidas no entorno do empreendimento e também estudar a bacia hidrográfica da região e sua topografia.

O projeto se desenvolve em uma área em que atualmente já se dispõe de uma barragem de terra dentro do campus da Universidade Federal de Lavras. Essa escolha é justificada com base na facilidade de obtenção dos dados hidrológicos e topográficos necessários para a concepção do projeto, e após o fornecimento de projetos preliminares da barragem por docentes da UFLA, foi possível dar sequência no dimensionamento.

Diferente da estrutura existente, seu dimensionamento será realizado utilizando material geossintético como elemento filtrante de um sistema de drenagem em substituição a materiais granulares com transição de granulometria.

O enfoque se dá nas análises geotécnicas e o estudo e cálculos hidráulicos apresentados foram realizados de maneira básica.

3.1 Materiais

Nos tópicos subsequentes serão descritos os materiais utilizados no dimensionamento da barragem.

Pelo fato de não ser possível encontrar os parâmetros de resistência do solo e outros dados imprescindíveis para a realização do dimensionamento da barragem e de seus elementos constituintes, muitos materiais e seus respectivos dados geotécnicos utilizados foram retirados de diferentes literaturas. Foram eles em sua maioria projetos similares existentes e trabalhos acadêmicos desenvolvidos pela discente como conteúdo programático da disciplina eletiva cursada denominada “Barragens de terra e enrocamento”.

Para este trabalho, todos os dados referentes aos estudos hidrológicos da área pesquisada que serão utilizados, foram obtidos por meio do projeto preliminar do barramento já existente no local de implantação e pelo trabalho de conclusão de curso intitulado “Análise técnica do dimensionamento hidráulico hidrológico de uma barragem construída na Universidade Federal de Lavras”, desenvolvido pela discente Fernandes Aparecida Martins.

3.1.1 Filtro

O filtro do projeto será constituído de dois materiais, sendo eles: brita e geossintético.

No trabalho será utilizado um geossintético geotêxtil com a função de filtração. O geotêxtil não tecido escolhido foi o MacTex® H 40.2, da Maccaferri, apresentado na Figura 19, e a escolha se deu devido à experiência e contato da discente com o assunto no decorrer de seu estágio obrigatório, quando se verificou a utilização deste geossintético como filtro de proteção entre rejeito e estéril rochoso em uma pilha de rejeito. O geotêxtil é composto por fibras cortadas de poliéster, agulhadas e consolidado termicamente por calandragem (MACAFFERRI, 2020).

Na Tabela 5 são apresentadas as especificações técnicas mais importantes, asseguradas pelo fabricante, a serem avaliadas para a elaboração de um projeto empregando o geossintético selecionado.

Tabela 5 - Propriedades do Geotêxtil não tecido MacTex® H 40.2.

Propriedades mecânicas	Norma	Unidade	H 40.2
Resistência à tração longitudinal	NBR ISO 10319	kN/m	10
Alongamento longitudinal	NBR ISSO 10319	%	>50
Resistência ao estouro	ASTM D4632	kPa	1500
Resistência ao rasgo	ASTM D4533	N	350
Propriedades hidráulicas	Norma	Unidade	H 40.2
Permissividade	NBR ISSO 11058	s-1	1,50
Velocidade do fluxo	NBR ISO 11058	m/s	0,09
Permeabilidade normal	NBR ISSO	cm/s	0,20
Abertura aparente (O ₉₅)	ASTM D 4751	mm	0,075
Propriedades físicas	Norma	Unidade	H 40.2
Comprimento	-	m	100 e 200
Largura	-	m	2,30 a 4,60
Espessura	NBR ISSO 9863-1	mm	1,3

Fonte: Adaptado de Maccaferri (2020).

Figura 19 - Geotêxtil MacTex® H 40.2.



Fonte: Mantas Brasil (2022).

Além do geotêxtil, o filtro contará com uma espessura horizontal constituída de brita, permitindo que a água tenha uma percolação adequada após a passagem pelo geossintético. Tendo como referência projetos de barragens já existentes utilizando material geotêxtil, foi escolhida a brita 0 como material granular.

Como o elemento principal atuante da filtração será o geotêxtil, não há a necessidade de verificação da Equação 16 e Equação 17, presentes no item 2.10. Os parâmetros de resistência do material utilizados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros da brita 0 adotados nas análises.

Material	Coesão (kN/m ²)	Ângulo de atrito (°)	γ_{sat} (kN/m ³)	k (m/s)
Brita 0	0,00	25,00	18,00	0,05

Fonte: Adaptado de Cândido (2020).

3.1.2 Dreno de pé

Para o dreno de pé, o material escolhido foi o enrocamento. A Tabela 7 contempla seus parâmetros de resistência e permeabilidade.

Tabela 7 – Parâmetros do enrocamento adotados nas análises.

Material	Coesão (kN/m ²)	Ângulo de atrito (°)	γ_{sat} (kN/m ³)	k (m/s)
Enrocamento	0,00	35,00	22,00	1,00

Fonte: Adaptado de Cândido (2020).

3.1.3 Fundação

Segue na Tabela 8 os parâmetros do solo utilizado na fundação.

Tabela 8 - Parâmetros do solo da fundação adotados nas análises.

Material	Coesão (kN/m ²)	Ângulo de atrito (°)	γ_{sat} (kN/m ³)	k (m/s)
Solo da fundação	25,00	25,00	16,50	$1,20 \times 10^{-7}$

Fonte: Adaptado de Cândido (2020).

Pelo fato do solo da fundação apresentar parâmetros de resistência favoráveis à construção de um barramento, como tratamento da fundação será utilizado apenas retirada do material superficial existente.

3.1.4 Aterro

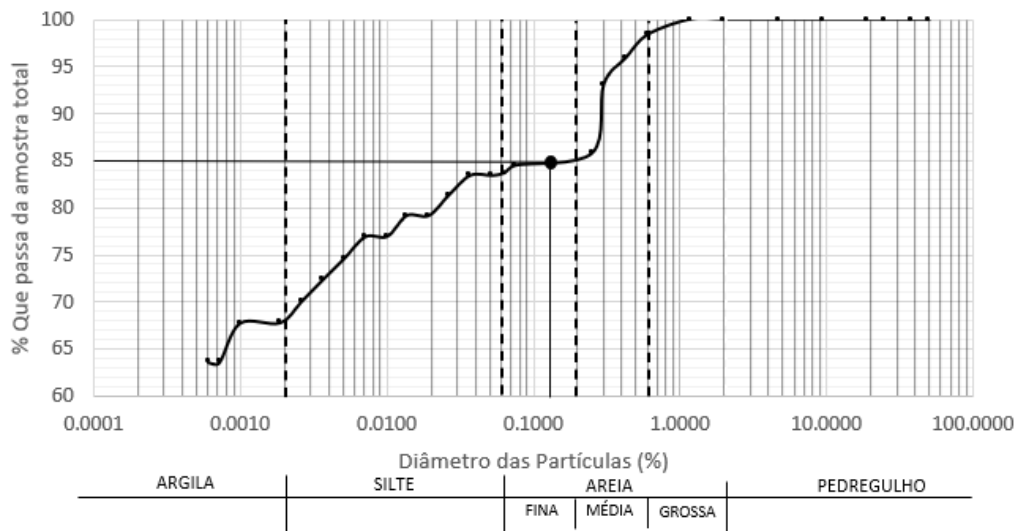
O material do aterro é constituído de um solo argilo-siltoso, e seus parâmetros de resistência e permeabilidade são mostrados na Tabela 9. Na Figura 20 está sua curva granulométrica.

Tabela 9 - Parâmetros do solo do aterro adotados nas análises.

Material	Coesão (kN/m ²)	Ângulo de atrito (°)	γ_{sat} e γ_{nat} (kN/m ³)	k (m/s)
Argila siltosa	4,16	32,08	19,00 e 12,00	$3,05 \times 10^{-7}$

Fonte: Adaptado de Cândido (2020).

Figura 20 - Curva granulométrica de um solo argiloso.



Fonte: Adaptado de Cândido (2020).

3.2 Métodos

Nos itens que seguem abaixo, serão apresentadas as metodologias utilizadas para o dimensionamento dos principais elementos de uma barragem de terra.

3.2.1 Altura da barragem

Ao valor da folga encontrado na Tabela 10, é somado o resultado da Equação 2. Com isso, é possível calcular o valor final da altura da barragem pela Equação 1.

Tabela 10 - Valores mínimos da folga.

Profundidade (m)	Extensão do espelho d'água (km)				
	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
até 6,00 m	0,85	0,95	1,05	1,15	1,25
6,10 a 9,00m	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35

Fonte: Lanças et al. (1988 citado por CARVALHO, 2008, p.66).

3.2.2 Largura da crista

Na Tabela 11 estão representados os valores mínimos da crista condicionados à altura da barragem, e além disso, seu valor é encontrado pela Equação 3.

Tabela 11 - Dimensões da crista em função da altura da barragem.

Altura da barragem em metros (H)	4	6	8	10	>12
Largura mínima da crista em metros (C)	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0

Fonte: Daker (1983 citado por CARVALHO, 2010, p.67).

3.2.3 Inclinação dos taludes

A inclinação dos taludes é determinada de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12 - Inclinação dos taludes de acordo com o material do aterro e sua altura.

Material do corpo da barragem	Altura da barragem			
	Até 5 m		De 5,1 até 10 m	
	Talude de montante	Talude de jusante	Talude de montante	Talude de jusante
Solos argilosos	2,00:1,00	1,75:1,00	2,75:1,00	2,25:1,00
Solos areno-siltosos/argilosos	2,25:1,00	2,00:1,00	3,00:1,00	2,25:1,00
Geral	2,50:1,00	2,00:1,00	2,50:1,00	2,00:1,00

Fonte: Adaptado de Matos, Silva, Pruski (2013).

3.2.4 Largura da base da seção transversal

A largura da base da seção transversal da barragem é obtida através da Equação 4.

3.2.5 Elementos de drenagem

Conforme já mencionado, o filtro será composto por material geossintético e uma parcela de material granular.

A Tabela 13 apresenta os valores das condições de contornos citadas na Equação 20.

Tabela 13 - Condições de contorno e suas aplicações.

Coefficiente	Valor	Aplicação
C1	1,00	Solos bem graduados e contínuos
	0,80	Solos uniformes e contínuos
C2	1,25	Solos densos e confinados
	0,80	Solos fofos e confinados
C3	1,00	Gradientes hidráulicos, $i < 5$
	0,80	Gradientes hidráulicos, $5 < i < 20$
	0,60	Gradientes hidráulicos, $20 < i < 40$
C4	1,00	Uso somente para filtração
	0,30	Uso para filtração e drenagem

Fonte: CFGG (1986).

A Tabela 14 contém os valores de A , onde t_g compreende a espessura, em metros, do geotêxtil utilizado, possibilitando o cálculo da Equação 21.

Tabela 14 - Valores do coeficiente A .

Coefficiente (A)	Aplicação
$10^3 t_g$	Gradientes baixos e solos limpos
$10^4 t_g$	Gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa
$10^5 t_g$	Gradientes elevados e obras de grande responsabilidade

Fonte: CFGG (1986).

O enfoque principal são os dois critérios citados acima, por serem fundamentais na escolha do material a ser utilizado.

As vazões q_1 e q_2 utilizadas na Equação 18 e Equação 19 foram obtidas através da versão estudantil do software Slide2, considerando o Método dos Elementos Finitos e fluxo em regime permanente. Os coeficientes de permeabilidade do solo estão na Tabela 1.

3.2.6 Obras acessórias

Nos tópicos seguintes serão descritos os métodos utilizados para o dimensionamento do extravasor, desarenador e tomada d'água, e a Tabela 15 apresenta os principais dados topográficos e hidrológicos que deram subsídio para os dimensionamentos.

Tabela 15 - Quadro resumo dos principais dados hidrológicos utilizados. Continua.

Informação	Valor
Nível d'água	875,20 m

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 15 - Quadro resumo dos principais dados hidrológicos utilizados. Conclusão.

Informação	Valor
Nível d'água máximo	875,70 m
Cota mais profunda da bacia	869,00 m
Extensão do espelho d'água	500,00 m
Volume de água acumulado	3256,20 m ³
Área da bacia	3,025 ha

Fonte: Da autora (2022).

3.2.6.1 Extravasar

Para o cálculo do extravasar utilizando a Equação 5, é necessária a análise da Tabela 16.

Tabela 16 – Coeficientes de rugosidade n de Manning.

Natureza das paredes	Condições	
	Regulares	Ruins
Canais de terra, retilíneos e uniformes	0,0225	0,0250
Canais abertos em rocha, lisos e uniformes	0,0330	0,0350
Canais com leito pedregoso e vegetação nos taludes	0,0350	0,0400
Canais com fundo de terra e talude com pedras	0,0330	0,0350
Canais com revestimento de concreto	0,0160	0,0180
Canais dragados	0,0300	0,0330
Gabião	0,0350	-

Fonte: Adaptado de Porto (1987).

Martins (2016) estudou a área onde será projetada a barragem, e analisando o dimensionamento hidráulico e hidrológico da região, constatou que a vazão máxima de cheia da bacia equivale a 12,33 m³. Para o cálculo da Equação 7 e Equação 8, é utilizada a Tabela 17.

Tabela 17 – Inclinação dos taludes de acordo com a estabilidade dos canais.

Natureza dos taludes	Inclinação (z:1)
Rocha dura, alvenaria comum, concreto	0:1,00 a 0,50:1,00
Argila dura	0,75:1,00
Aluviões compactos	1,00:1,00
Cascalho grosso	1,50:1,00
Enrocamento, terra, areia grossa	2,00:1,00
Terra mexida, areia normal	3,00:1,00

Fonte: Adaptado de Carvalho (2019).

3.2.6.2

3.2.6.2 Desarenador

Para que seja possível dimensionar o desarenador utilizando a Equação 9 e 12, alguns parâmetros são retirados da Tabela 18 e Tabela 19.

Tabela 18 – Coeficientes de rugosidade C de Hazen-Williams.

Tipo de tubo	C
Aço corrugado	60
Chumbo	130
Cobre	130
Concreto (bom acabamento)	130
Ferro fundido novo	130
Latão	130
Vidro	140
Plástico	140

Fonte: Adaptado de Carvalho (2019).

Tabela 19 - Valores do parâmetro C .

Cobertura	Declive	Período de retorno (anos)		
		50	100	500
Campos cultivados	0-2%	0,43	0,47	0,57
	2-7%	0,48	0,51	0,60
	>7%	0,51	0,54	0,61
Pastos	0-2%	0,37	0,41	0,53
	2-7%	0,45	0,49	0,58
	>7%	0,49	0,53	0,60
Florestas e reflorestamento	0-2%	0,35	0,39	0,48
	2-7%	0,43	0,47	0,56
	>7%	0,48	0,52	0,58

Fonte: Adaptado de Carvalho (2019).

3.2.6.3 Tomada d'água

Para o dimensionamento da tomada d'água, a resolução da Equação 14 depende de dados retirados da Tabela 18.

3.2.7

3.2.7 Análise de fluxo

Para a análise de fluxo, também denominada análise de percolação, foi utilizada a versão estudantil do software Slide2 da Rocscience. O software pode ser utilizado para confecção de projetos, sendo eles de contenção, estabilização de taludes, barragens e pilhas, entre outros. Além disso, pode ser utilizado para elaboração de laudos técnicos, consultorias e perícias.

O software realiza a análise através do Método dos Elementos Finitos. A análise de percolação foi realizada para prever o comportamento da água em duas situações, sendo ela sob fluxo em regime permanente e transiente.

O regime permanente compreende o barramento em pleno funcionamento, com cota do nível de água constante. O regime transiente compreende o rebaixamento do lençol freático, e foi considerado esvaziamento do barramento em 10 dias.

Para a realização das análises empregando o software faz-se necessário informar a geometria do barramento bem como os coeficientes de permeabilidade de cada material constituinte e a cota do nível de água.

A análise de fluxo também informa se o filtro está tendo o comportamento esperado. No trabalho em questão, como mencionado anteriormente, o filtro é composto por um material geotêxtil e um granular (brita 0). No software, não é possível inserir como dados de entrada as capacidades filtrantes do geossintético, apenas dados referentes à sua resistência mecânica. Com isso, a capacidade filtrante do geotêxtil é assegurada apenas pelos cálculos apresentados no tópico 2.10.1.

A Tabela 20 apresenta os coeficientes de permeabilidade de cada material que constitui a barragem e que foram utilizados como dados de entrada no software.

Tabela 20 - Parâmetros utilizados nas análises de fluxo.

Local	Material	k (m/s)
Filtro	Brita 0	0,05
Dreno de pé	Enrocamento	1,00
Fundação	Solos da fundação	$1,20 \times 10^{-7}$
Aterro	Argila siltosa	$3,05 \times 10^{-7}$

Fonte: Adaptado de Cândido (2020).

3.2.8 Análise de estabilidade

Para a análise de estabilidade empregou-se a versão estudantil do software Slide2 da Rocscience. O programa utiliza o Método do Equilíbrio Limite e necessita que seja informado, além da geometria do maciço, os parâmetros de resistência dos materiais constituintes.

Nas análises de estabilidade dos taludes foram verificadas quatro situações: final de construção, operação, rebaixamento rápido do nível de água e sísmica. Em todas as situações foram realizadas a análise normal e a análise de sensibilidade.

A primeira, é relativa ao fim de construção, com reservatório vazio, tanto para montante quanto para jusante. Nessa análise, para o aterro, foi considerado o seu peso específico natural, visto que o reservatório se encontra desocupado e os vazios do solo ainda não foram preenchidos por água. Para os outros locais, foi considerado o peso específico saturado

A segunda situação analisada, para jusante, é com o barramento em operação, estando o reservatório cheio.

A terceira análise, à montante, também denominada de transiente, diz respeito ao rebaixamento rápido do lençol freático, com esvaziamento do reservatório em 10 dias.

Por último, foi realizada a análise sísmica, também denominada pseudo-estática, considerando a presença de sismos no local do barramento. Embora não haja histórico de sismos na região de implantação do barramento, é possível que sismos sejam induzidos pelo enchimento do reservatório. Com isso, é recomendada pela Eletrobrás (2003) a adoção de valores para a aceleração sísmica nas direções horizontal e vertical correspondentes a 0,05g e 0,03g respectivamente. É importante salientar que se trata de uma recomendação e não de valores normativos, podendo ser majorados conforme as circunstâncias do local.

No software, é possível escolher para quais métodos serão calculados os fatores de segurança. Os escolhidos foram o de Spencer e Morgenstern Price, pelo fato de a superfície de deslizamento poder ser de formato não circular, e o resultado final será o menor valor encontrado. A ruptura escolhida para análise foi a ruptura não circular, e o software realiza uma pesquisa de refinamento automático.

A Tabela 21 apresenta o resumo dos parâmetros de resistência dos solos que constituem o empreendimento e que foram utilizados como dados de entrada no software.

Tabela 21 - Parâmetros utilizados na análise normal.

Local	Material	Coesão (kN/m²)	Ângulo de atrito (°)	$\gamma_{\text{sat}} / \gamma_{\text{nat}}$ (kN/m³)	k (m/s)
Filtro	Brita 0	0,00	25,00	18,00 / -	0,05
Dreno de pé	Enrocamento	0,00	35,00	22,00 / -	1,00
Fundação	Solos da fundação	25,00	25,00	16,50 / -	1,20 x 10 ⁻⁷
Aterro	Argila siltosa	4,16	32,08	19,00 / 12,00	3,05 x 10 ⁻⁷

Fonte: Adaptado de Cândido (2020).

A variação dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade é mostrada na Tabela 22. Foi adotado um desvio padrão de $\mu = \pm 3$ unidades de medida, para todos os parâmetros. Na brita 0 e no enrocamento, pelo fato de sua coesão inicial ser 0, foi usado somente um desvio de $\mu = + 3$.

Tabela 22 – Variação dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

Local	Material	Coesão (kN/m²)	Ângulo de atrito (°)	$\gamma_{sat} / \gamma_{nat}$ (kN/m³)
Fundação	Solos da fundação	22,00 a 28,00	23,00 a 28,00	13,50 a 19,50 / -
Aterro	Argila siltosa	1,16 a 7,16	29,08 a 35,08	16,00 a 22,00 / 9,00 a 15,00
Filtro	Brita 0	0,00 a 3,00	23,00 a 28,00	15,00 a 21,00 / -
Dreno de pé	Enrocamento	0,00 a 3,00	33,00 a 38,00	19,00 a 25,00 / -

Fonte: Adaptado de Cândido (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Dimensionamento da barragem

Nos tópicos abaixo serão apresentados os resultados e discussões a respeito do dimensionamento dos principais elementos constituintes de uma barragem de terra.

4.1.1 Altura da barragem

Em consonância com a Tabela 10, o valor da folga compreende 0,85 m. Através da Equação 2, é possível calcular o valor da altura da onda, de 0,74 m. Como ao valor da folga deve ser somado o valor de h_0 , o valor total da folga adotada resulta em 1,59 m, mas para facilitar a execução da obra, será adotado como folga o valor de 1,65 m.

Assim, a Equação 1 resulta em 8,35 m de altura da barragem.

4.1.2 Largura da crista

Adotando 8,35 metros para a altura total, é possível obter a largura da crista através da Equação 3, resultando em 4,67 m. Porém, como sob o barramento irá passar uma estrada, o valor adotado para a crista será de 6 metros.

4.1.3 Inclinação dos taludes

Como o solo utilizado para o aterro do barramento corresponde a uma argila siltosa e sua altura está compreendida entre 5,10 e 10,00 m, de acordo com a Tabela 12, a inclinação para o talude de montante será inicialmente de 2,75:1,00 e do talude de jusante, 2,25:1,00.

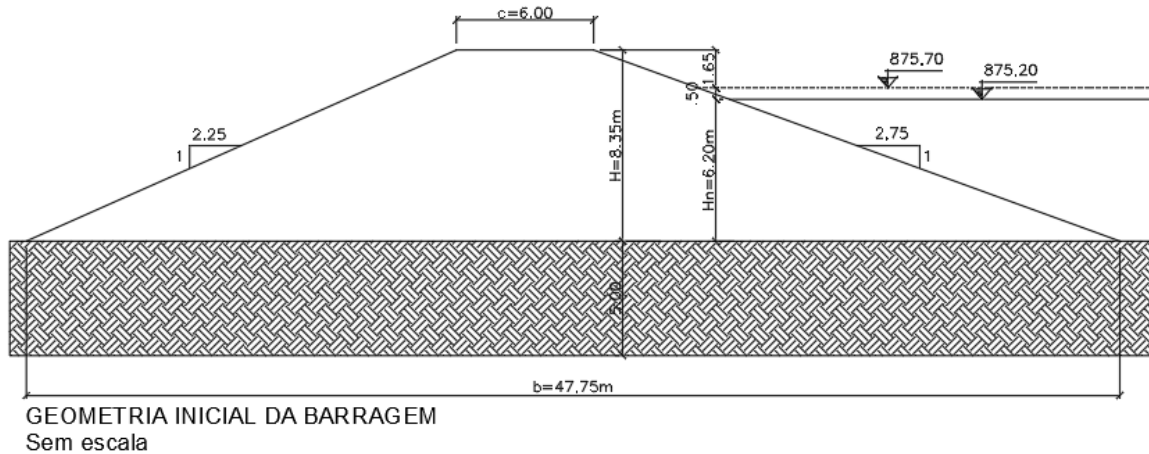
É válido salientar que essas inclinações são recomendações práticas para um pré-dimensionamento, e que sua escolha é validada através de análises de estabilidade dos taludes tanto de jusante quanto de montante.

4.1.4 Largura da base da seção transversal

Com os valores encontrados da crista, inclinações e altura total da barragem, é possível através da Equação 4 calcular o valor da largura da base, resultando em 47,75 m.

A geometria inicial básica da barragem, sem as obras acessórias e sem o filtro, é exibida na Figura 21, sem escala.

Figura 21 - Seção transversal da barragem.



Fonte: Da autora (2022).

4.1.5 Elementos de drenagem

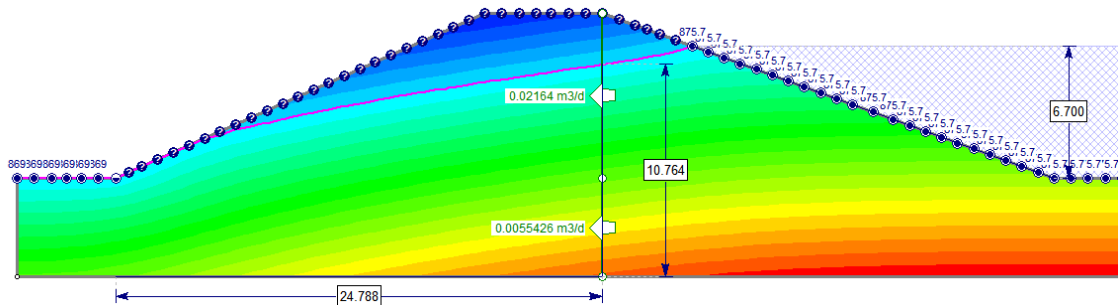
Avaliando o critério de retenção, é utilizada a Tabela 13. Para sua análise, foi considerado solo bem graduado, denso, gradiente hidráulico menor que 5, uso para filtração e drenagem. O valor de d_{85} foi estimado a partir da Figura 20, correspondendo a aproximadamente 0,25 mm. Sabendo que 0_{95} vale 0,075 mm conforme a Tabela 5, é calculado a partir da Equação 20 o valor de 0,093 mm. Como 0,075 mm é menor que 0,093 mm, é possível afirmar que o critério de retenção está satisfeito.

Retomando à Equação 20 e deixando o d_{85} como incógnita, é possível obter 0,20 mm. Dessa forma, caso não seja possível ter uma curva granulométrica precisa do material que estará em contato com o geossintético, com a finalidade de estimativas, solos com o d_{85} maior ou igual a 0,20 mm irão garantir que o filtro tenha potencial de retenção eficaz.

A respeito do critério de permeabilidade, para a análise da Tabela 14, foi considerado gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa, 1,3 mm de espessura do geotêxtil e k_s com valor de 10^{-6} m/s, conforme Tabela 20. Encontra-se o valor de k_n pela Equação 21, resultando em $7,80 \times 10^{-5}$ m/s. Com base na Tabela 5, o valor de k_n do geotêxtil é de 0,0020 m/s, valor maior que o calculado. Com isso, o critério de retenção está assegurado.

Para o dimensionamento do filtro vertical e horizontal, através do software Slide 2, foram encontradas as vazões que passam pelo maciço e pela fundação, sendo os valores de q_1 e q_2 respectivamente $2,16 \cdot 10^{-2}$ e $5,54 \cdot 10^{-3}$ m³/dia. A altura do filtro na vertical, L_1 , equivale a 6,70 m. Considerando que o tapete drenante se inicia na direção da crista, seu comprimento na horizontal, L_2 , é de aproximadamente 24,80 m. A carga hidráulica do reservatório vale 6,70 m e Δh corresponde a 10,76 m (Figura 22).

Figura 22 - Vazões que passam pelo maciço e pela fundação.



Fonte: Da autora (2022).

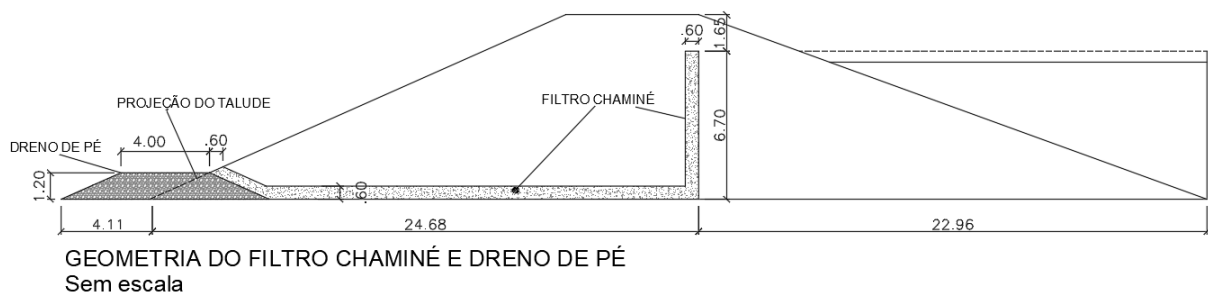
A partir da Equação 18, encontra-se o valor da espessura do filtro, sendo de $5,00 \times 10^{-5} \text{ m}$. A Equação 19 resulta em $1,45 \times 10^{-4} \text{ m}$. De acordo com a Eletrobrás (2003), a dimensão mínima para um filtro vertical ou inclinado é de 0,60 m. Com isso, tanto A_1 quanto A_2 terão como espessura 0,60 m de brita 0.

A brita será revestida com o geotêxtil, a montante, em contato com a fundação e em contato com o dreno de pé (Figura 24). O topo do filtro chaminé será revestido com 0,60 m do material para que seja possível sua fixação, realizada geralmente com pedras (Figura 25). A parte inclinada do tapete drenante e em contato com a fundação será revestida com o geossintético, evitando também o carreamento de partículas.

Sabendo que a espessura do filtro chaminé é de 0,60 m e adotando o dobro dessa espessura para a altura do dreno de pé, têm-se que a altura corresponde à 1,20 m. Para a sua crista, foi adotado o valor de 4 m, e sua inclinação segue a do talude à jusante, de 1V:2,25H.

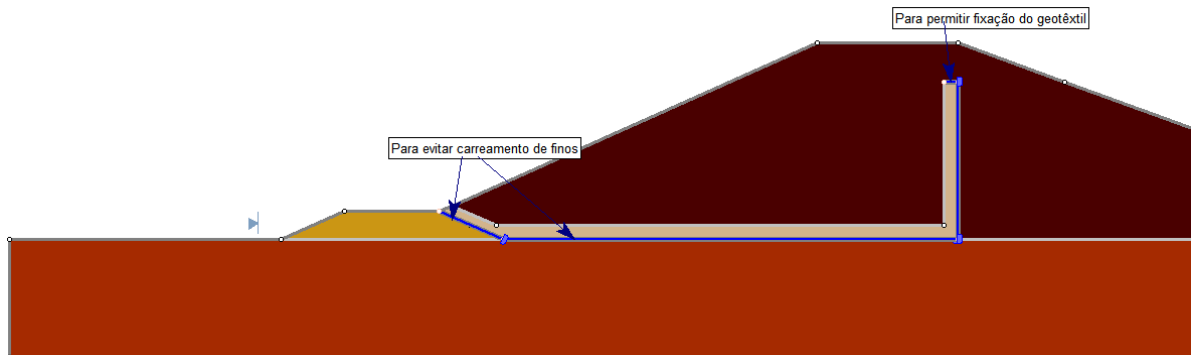
Após o dimensionamento do filtro e do dreno de pé, segue na Figura 23 a geometria da barragem com esses elementos.

Figura 23 - Geometria final do filtro chaminé e do dreno de pé.



Fonte: Da autora (2023).

Figura 24- Locação do geotêxtil no filtro.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 25 - Pedra utilizada como suporte do geotêxtil.



Fonte: Mexichem Bidim LTDA (2011).

4.1.6 Obras acessórias

Seguem nos tópicos abaixo os resultados do dimensionamento das estruturas hidráulicas.

4.1.6.1 Extravasor

Para a largura da base do canal foi adotado um valor arbitrário de 2,00 m, para a altura máxima de água no canal, também de maneira arbitrária, foi adotada como 1,00 m.

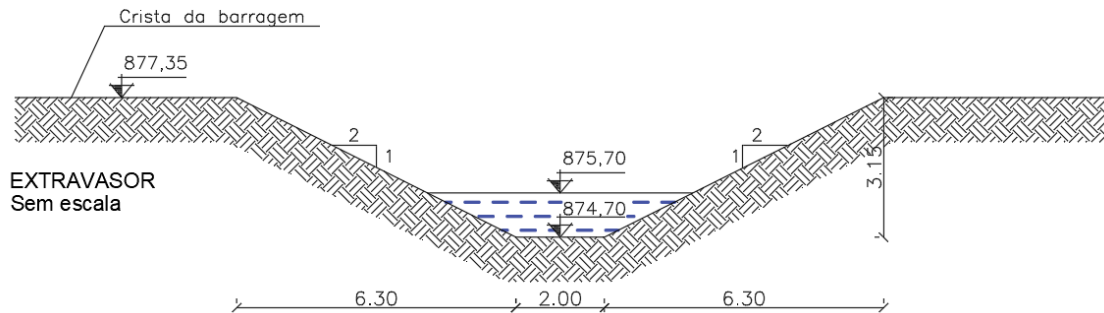
Como não há informações a respeito do solo ao qual será construído o canal, será considerada a natureza do talude como terra. Assim, o valor de z de acordo com a Tabela 17 corresponde a 2,00%. A Equação 7 resulta em 4 m² de área e a Equação 8 em 6,47 m para o perímetro. O raio hidráulico (Equação 6) vale 0,618 m.

Considerando canais de terra, retilíneos e uniformes e sendo a favor da segurança escolhendo a pior condição, o valor para n adotado de acordo com a Tabela 16 é de 0,025.

Assim, o valor para a vazão suportada é encontrado pela Equação 5, correspondendo à 16,42 m³. A vazão máxima de cheia da bacia corresponde à 12,33 m³, e com isso, é possível afirmar que o dimensionamento do canal se deu de maneira eficaz.

Na Figura 26 apresenta-se o dimensionamento do extravasor por canal lateral com declividade.

Figura 26 - Dimensionamento do extravasor.



Fonte: Da autora (2022).

4.1.6.2 Desarenador

A altura de lâmina d'água acima do desarenador equivale a 5,70 metros e a base do barramento tem 47,75m. A Equação 10 resulta no valor final da perda de carga unitária de 0,06 m/m.

Para encontrar a intensidade de precipitação, através da Equação 13, foi considerado como tempo de retorno 500 anos e 5 minutos de duração da precipitação. Os parâmetros k , a , b , e c , de acordo com o site do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras, valem respectivamente 10224, 0,187, 56,281 e 1,149. Seu valor final é de 288,86 mm/h.

Como o período de retorno é de 500 anos e o local em que o barramento será instalado se assemelha a um pasto, adotando um declive entre 2% e 7% e perante a Tabela 18, obtêm-se o valor de 0,58. A área da bacia equivale a 3,025 hectares (Tabela 15), e retornando à Equação 12, têm-se a vazão final de projeto, com valor de 1,41 m³/s.

Voltando à vazão de esvaziamento, pela Equação 11, é possível encontrar o seu valor final, de 1,414 m³/s, considerando o tempo para esvaziamento da represa de 10 dias e 3256,20 m³ como volume acumulado acima do desarenador (Tabela 15).

Por fim, após todos os cálculos, é possível retornar à Equação 9. O coeficiente de rugosidade é extraído da Tabela 16. Como os materiais mais utilizados para essa finalidade são de concreto ou ferro fundido novo, o valor para C é de 130. O diâmetro da tubulação encontrado foi de 520 mm. Considerando os diâmetros comerciais de tubulação, têm-se que os mais

utilizados são de 175 mm e de 150 mm. Utilizando o de maior dimensão, encontra-se 3 tubulações com 175 mm de diâmetro.

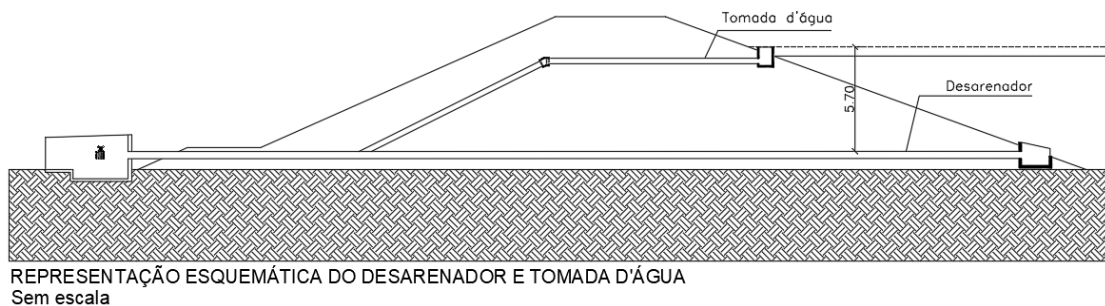
4.1.6.3 Tomada d'água

Para o dimensionamento da tomada d'água, H corresponde à 5,70 m e L a 47,75 m. J resulta então, de acordo com a Equação 15, em 0,12 m/m.

Retornando à Equação 14, considerando a vazão final de projeto de 1,41 m³/s e o valor de C retirado da Tabela 18, encontra-se o diâmetro de 450 mm. Considerando diâmetro comercial de 150 mm, serão utilizados 3 tubos.

Na Figura 27 tem-se a representação esquemática, sem escala, da posição da tomada d'água e do desarenador. Ambos tiveram apenas o diâmetro e quantidade da tubulação dimensionados. As caixas de entrada e saída e junções são apenas representativas.

Figura 27 - Representação esquemática da tomada d'água e desarenador.



Fonte: Da autora (2022).

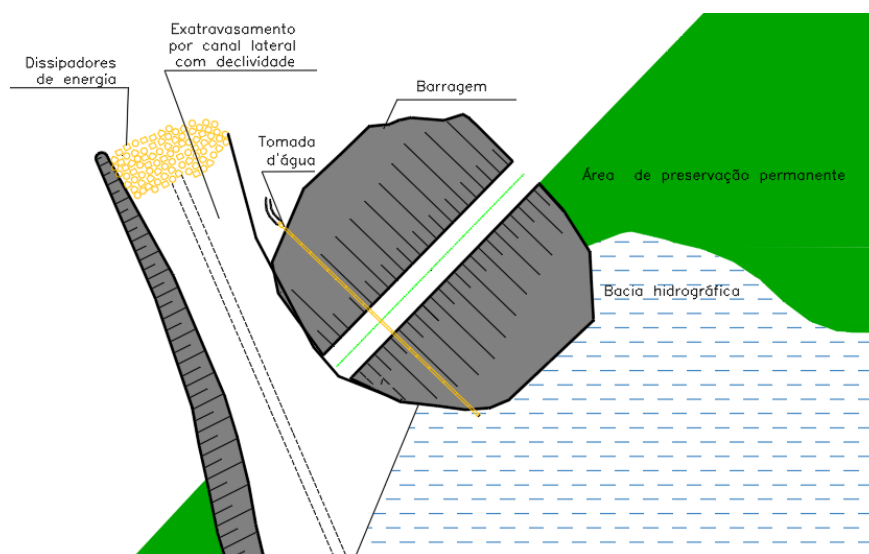
4.1.6.4 Dissipadores de energia

Como dissipadores de energia, será utilizado enrocamento, sem o emprego de aglomerante, no final do extravasor.

4.1.7 Local de instalação

Na Figura 28 está apresentada uma parte do projeto preliminar que corresponde à instalação do barramento e de suas estruturas hidráulicas.

Figura 28 - Locação do barramento e de suas estruturas hidráulicas.



Fonte: Da autora (2022).

4.1.8 Resumo dos aspectos construtivos

Na Tabela 23 é apresentado o resumo do dimensionamento dos principais elementos que constituem uma barragem.

Tabela 23: Quadro resumo dos principais elementos dimensionados.

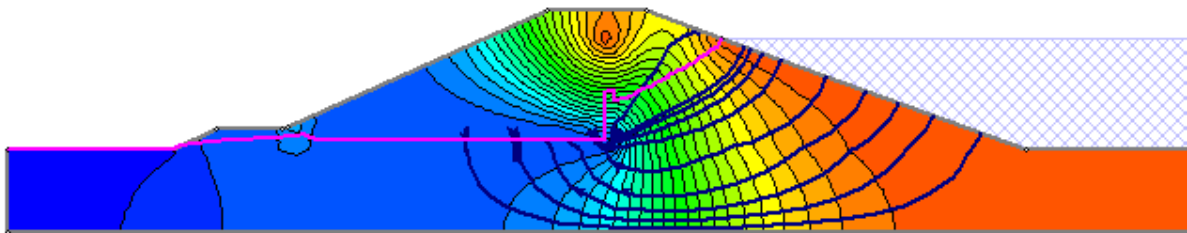
Elemento da barragem	Resultado
Altura	8,35 metros
Largura da crista	6,00 metros
Inclinação dos taludes	2,25H0:1,00V à montante 2,75H:1,00V à jusante
Largura da base	47,75 metros
Filtro vertical	0,60 metros
Filtro horizontal	0,60 metros
Dreno de pé	4,00 metros de crista 1,20 metros de altura 2,25H:1,00V de inclinação 2,00 metros de base
Extravasador	1,00 de altura máxima do canal de água Inclinação de 2,00 %
Desarenador	3 tubos de 175 mm
Tomada d'água	3 tubos de 150 mm

Fonte: Da autora (2023).

4.2 Análise de fluxo

Considerando que a bacia do reservatório se encontra na cota máxima de 875,70 metros (Tabela 15), é possível observar o comportamento do fluxo da água dentro da barragem (Figura 29). Na imagem é possível observar as linhas equipotenciais, representadas pelo traçado mais fino, as linhas de fluxo, representadas pelo traçado mais grosso e a linha freática, que corresponde à linha da cor roxa. É evidente que a percolação está ocorrendo de maneira esperada, sendo direcionada ao filtro chaminé, ao tapete drenante e ao dreno de pé.

Figura 29 - Linhas de fluxo e equipotenciais.

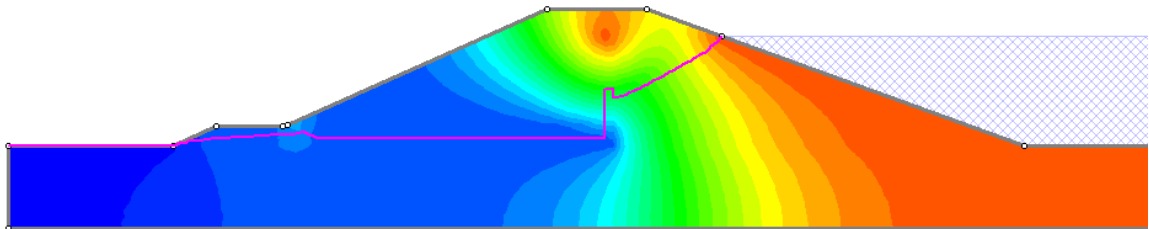


Fonte: Da autora (2022).

4.2.1 Regime permanente

Segue na Figura 30 a análise realizada para o regime permanente.

Figura 30 - Resultado da análise em regime permanente.

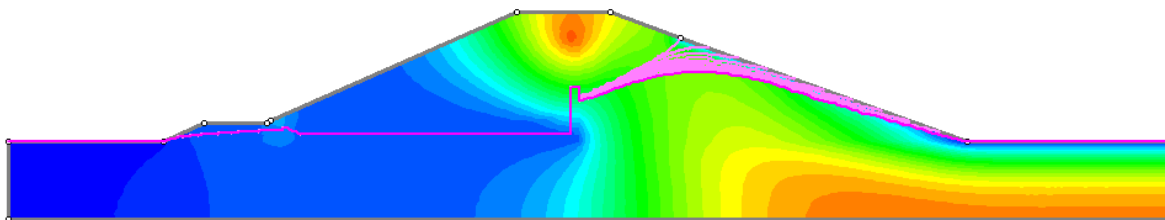


Fonte: Da autora (2022).

4.2.2 Regime transiente

Retratando o comportamento do fluxo de água no regime transiente, a Figura 31 compreende o resumo do comportamento observado nos dez dias de estágio.

Figura 31 - Resumo dos estágios da análise em regime transiente.



Fonte: Da autora (2022).

4.3 Análise de estabilidade

A seguir serão apresentados os resultados para as quatro análises principais, considerando análise de estabilidade normal e de sensibilidade.

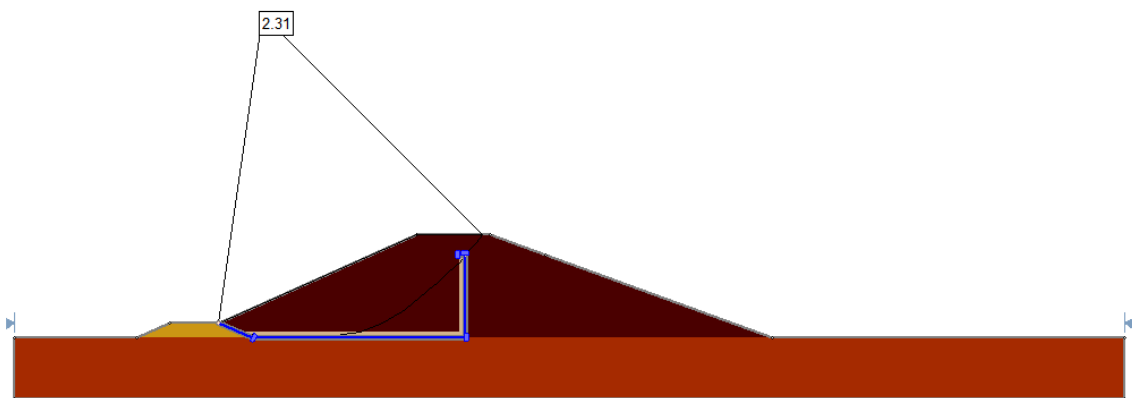
4.3.1 Fim de construção

Na Figura 32 e na Figura 33 são exibidos os resultados das análises considerando o final de construção do barramento, sem a presença de água no reservatório.

4.3.1.1 Análise normal

O resultado encontrado para o FS à jusante foi de 2,31 para Spencer e Morgenstern Price (Figura 32).

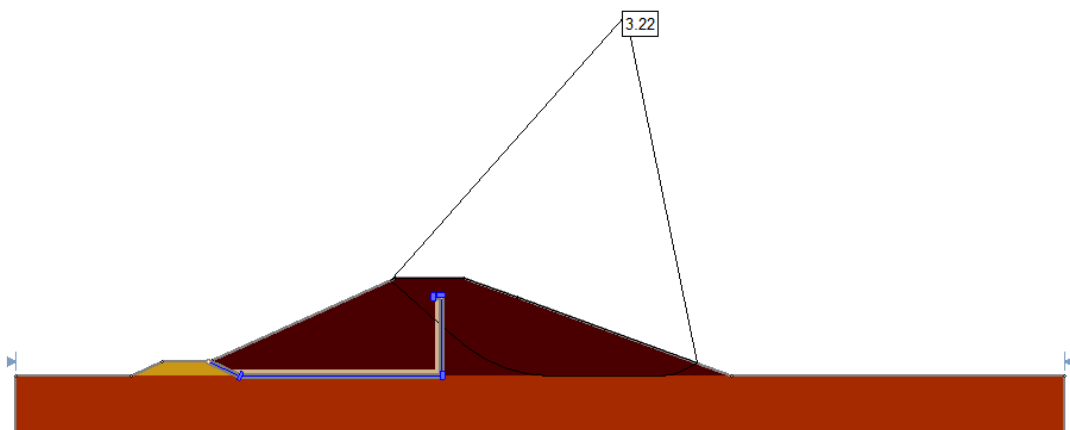
Figura 32 – FS para jusante no final da construção.



Fonte: Da autora (2022).

Para montante, os resultados obtidos foram de 3,22 para Spencer e Mongestern Price (Figura 33).

Figura 33 – FS para montante no final da construção.



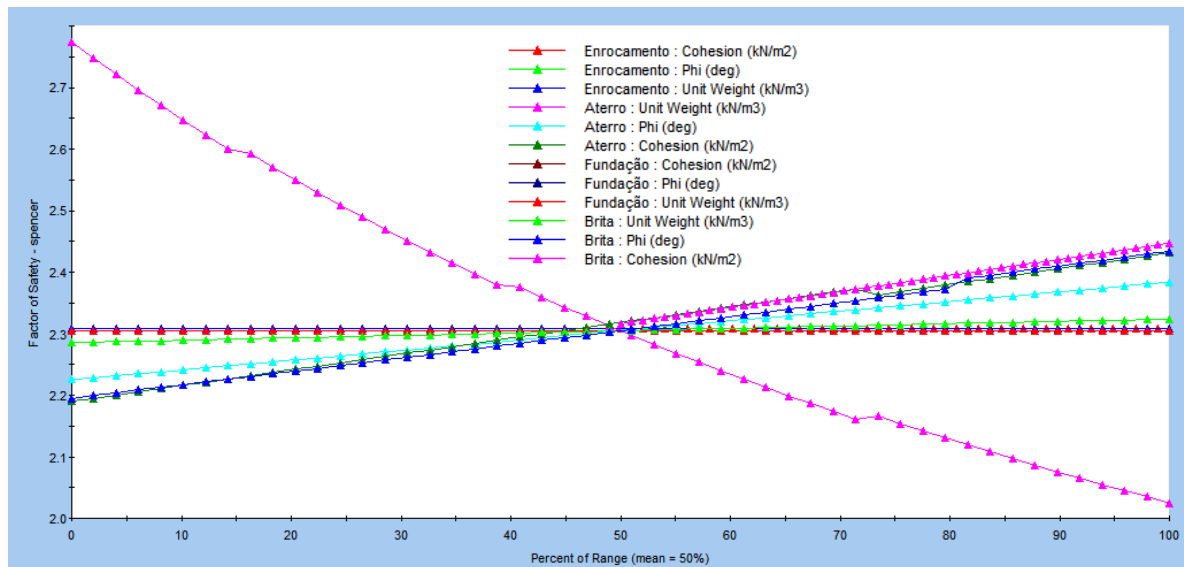
Fonte: Da autora (2022).

Como o material do aterro se encontra não saturado e barragem ainda não se encontra em operação, é possível observar que a análise de estabilidade resulta em fatores de segurança altos.

4.3.1.2 Análise de sensibilidade

De acordo com a Figura 34, no eixo das abscissas está representada a porcentagem do intervalo e no eixo das ordenadas, o fator de segurança. Na legenda da imagem, “cohesion” significa coesão, “phi” representa o ângulo de atrito e “unit weight” é o peso específico. É possível identificar que independentemente das variações dos parâmetros, foi possível obter os FS atendendo às normas para a situação de final de construção, considerando o talude à jusante.

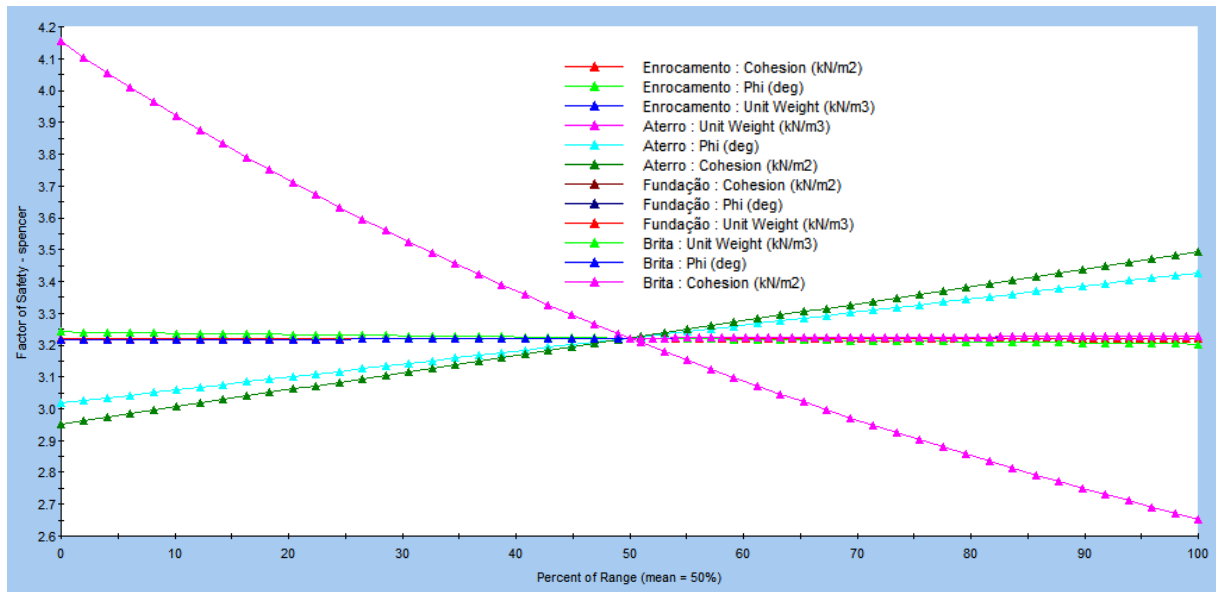
Figura 34 - Gráfico de sensibilidade para final de construção à jusante.



Fonte: Da autora (2022).

O FS para o talude a montante também se enquadra no que é preconizado por normas (Figura 35).

Figura 35 – Gráfico de sensibilidade para final de construção à montante.



Fonte: Da autora (2022).

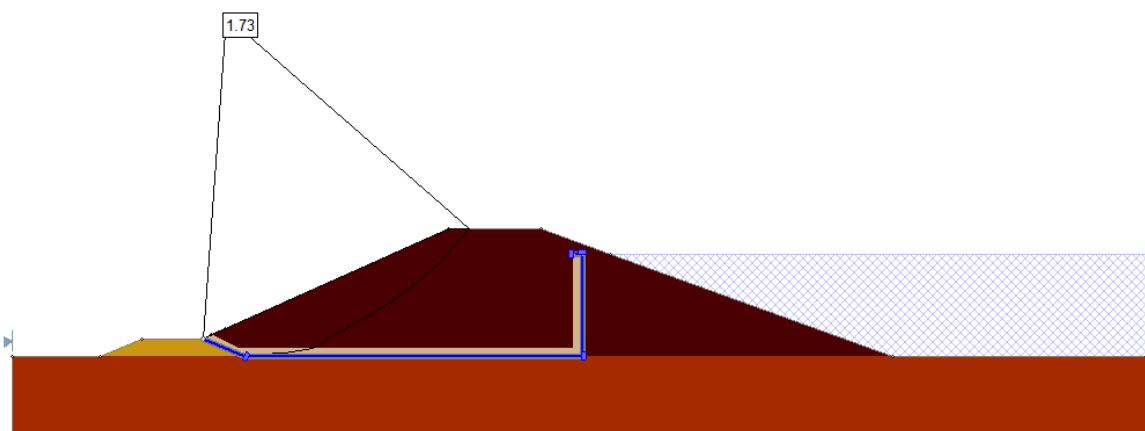
4.3.2 Durante a operação

Considerando o reservatório cheio e em operação, foram realizadas as análises normal e transiente.

4.3.2.1 Análise normal

A análise normal considerando a barragem em seu pleno funcionamento e com o reservatório cheio resultou-se em 1,73 para o FS seguindo o método de Morgenstern Price e em 1,75 para Spencer (Figura 36).

Figura 36 - FS à jusante para barragem em funcionamento.

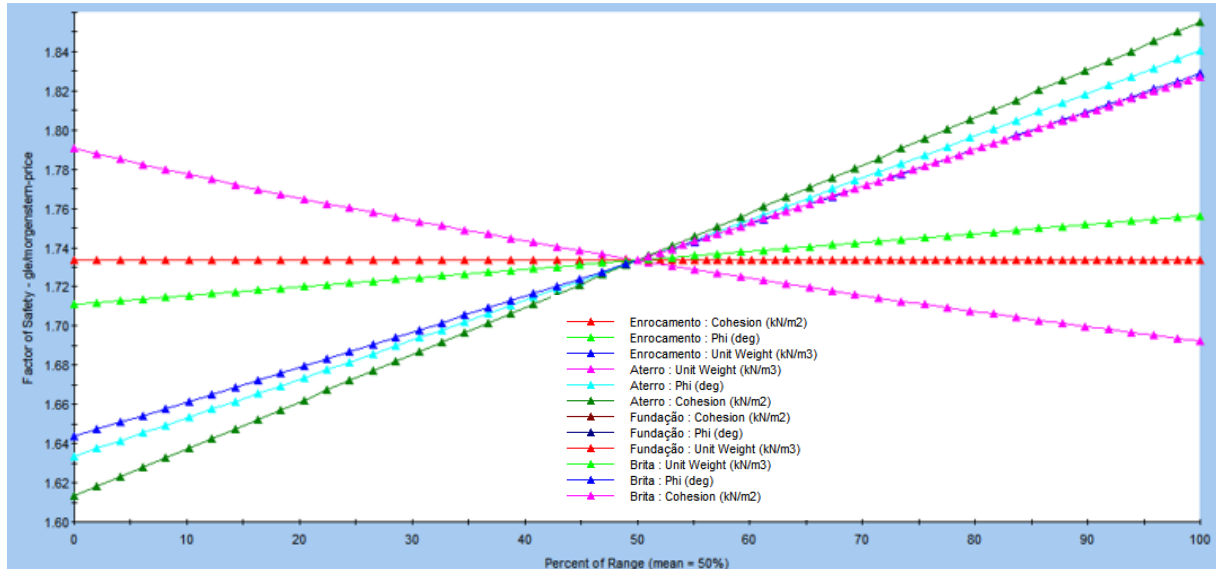


Fonte: Da autora (2022).

4.3.2.2 Análise de sensibilidade

Após a análise de estabilidade normal, foi gerado o gráfico de sensibilidade (Figura 37). Apesar da variação dos parâmetros, foi possível obter o FS mínimo de 1,50.

Figura 37 - Gráfico de sensibilidade durante operação à jusante.



Fonte: Da autora (2022).

Se comparado com a estrutura em fim de construção, é possível observar que os FS para a barragem em operação, tanto na análise normal quanto de sensibilidade, caíram consideravelmente. Isso evidencia o quanto a percolação de água dentro do maciço contribui negativamente para a sua estabilidade.

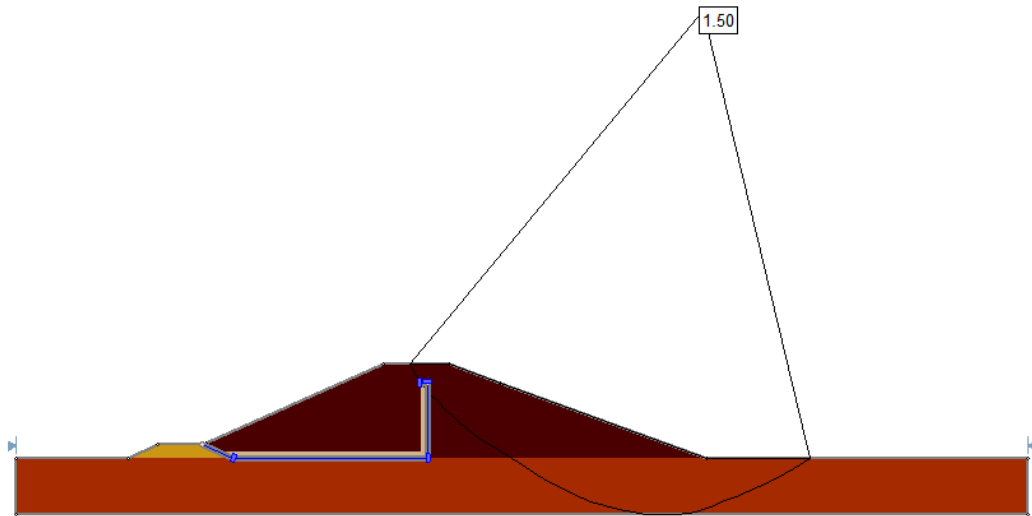
4.3.3 Reservatório rebaixado

Para a análise do reservatório sendo rebaixado, foi considerado rebaixamento rápido, com esvaziamento completo ocorrendo em 10 dias.

4.3.3.1 Análise normal

O FS no valor de 1,50 foi encontrado considerando a análise de estabilidade normal, tanto para Spencer quanto para Morgenstern Price, e se referem ao décimo dia, o dia mais crítico do estágio (Figura 38). O fator de segurança diminui com o passar dos dias pois o solo acima da linha freática ainda se encontra saturado, e conseqüentemente, com um peso maior. Além disso, a água sobre o talude de montante age como uma força estabilizante, e ao ser retirada, contribui para a diminuição do FS. Os fatores de segurança de todos os dias de estágio estão apresentados na Tabela 24.

Figura 38 - FS para o décimo dia de rebaixamento, à montante.



Fonte: Da autora (2022).

Tabela 24 - Fatores de segurança em cada dia do estágio.

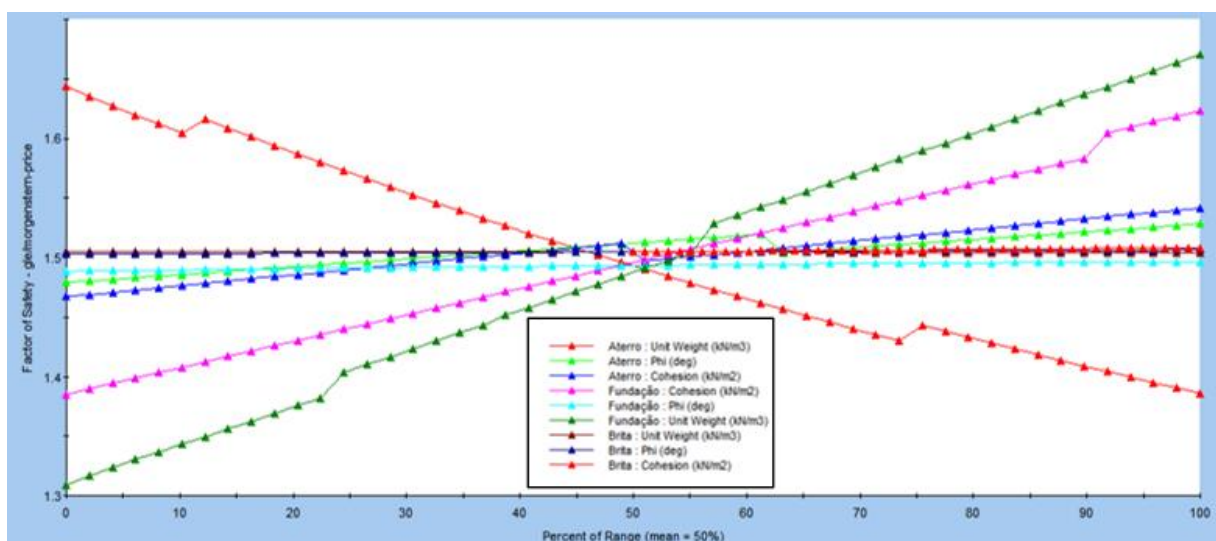
Dia do estágio	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
FS	2,92	2,70	2,45	2,23	2,06	1,91	1,79	1,68	1,59	1,50

Fonte: Da autora (2023).

4.3.3.2 Análise de sensibilidade

Conclui-se que apesar das variações, o FS esperado, no valor de 1,30, é encontrado. O FS para o talude a montante também se enquadra no que é preconizado por normas (Figura 39).

Figura 39 - Gráfico de sensibilidade para rebaixamento rápido à montante.



Fonte: Da autora (2022).

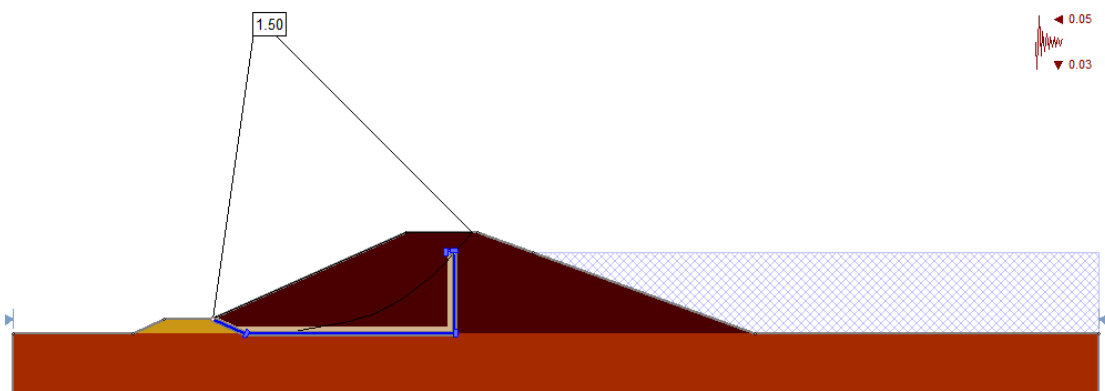
4.3.4 Solicitação sísmica

Embora a região de implantação do barramento seja considerada de baixa sismicidade, foi necessário avaliar aos fatores de segurança perante solicitação sísmica.

4.3.4.1 Análise normal

Como pode-se observar na Figura 40, para jusante, obteve-se fator de segurança igual a 1,50 para o método de Morgenstern Price. Para Spencer, o resultado foi e 1,51.

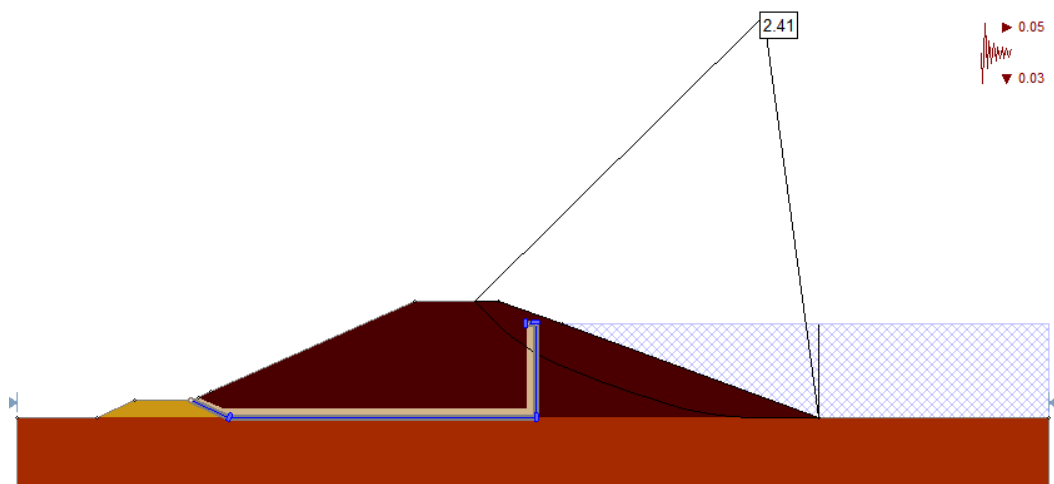
Figura 40 - FS para jusante considerando análise sísmica.



Fonte: Da autora (2022).

Para montante, têm-se 2,41 de FS considerando o método de Morgenstern Price e 2,42 para Spencer (Figura 41).

Figura 41 - FS para montante considerando análise sísmica.



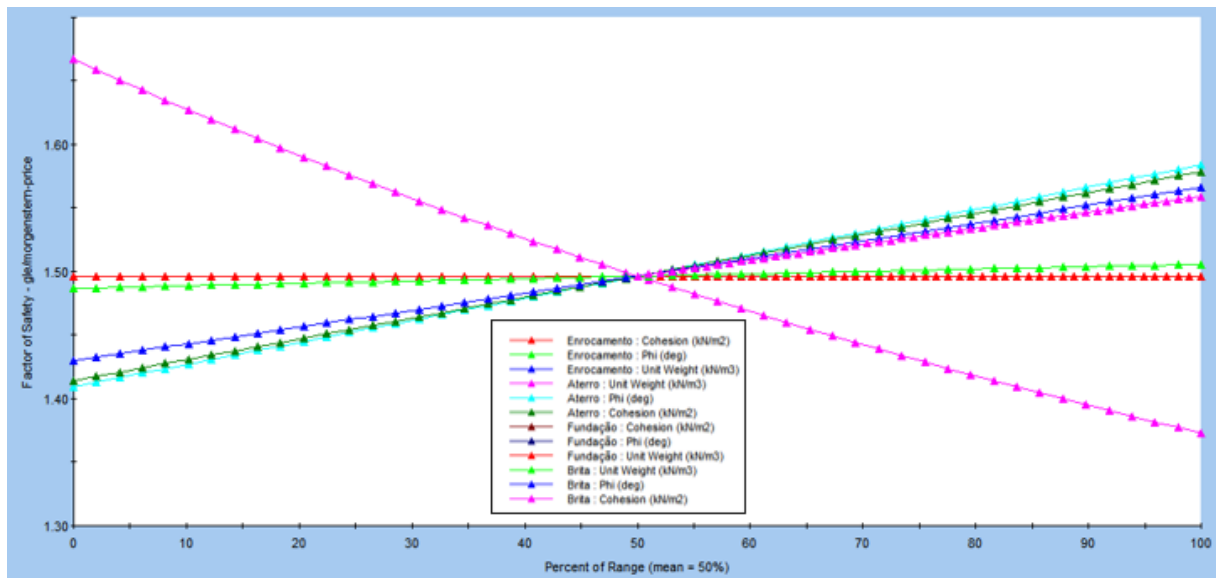
Fonte: Da autora (2022).

É importante ressaltar que sob solicitação sísmica, os fatores de segurança diminuem mais ainda, pelo fato de se considerarem as forças oriundas de abalos sísmicos na região.

4.3.4.2 Análise de sensibilidade

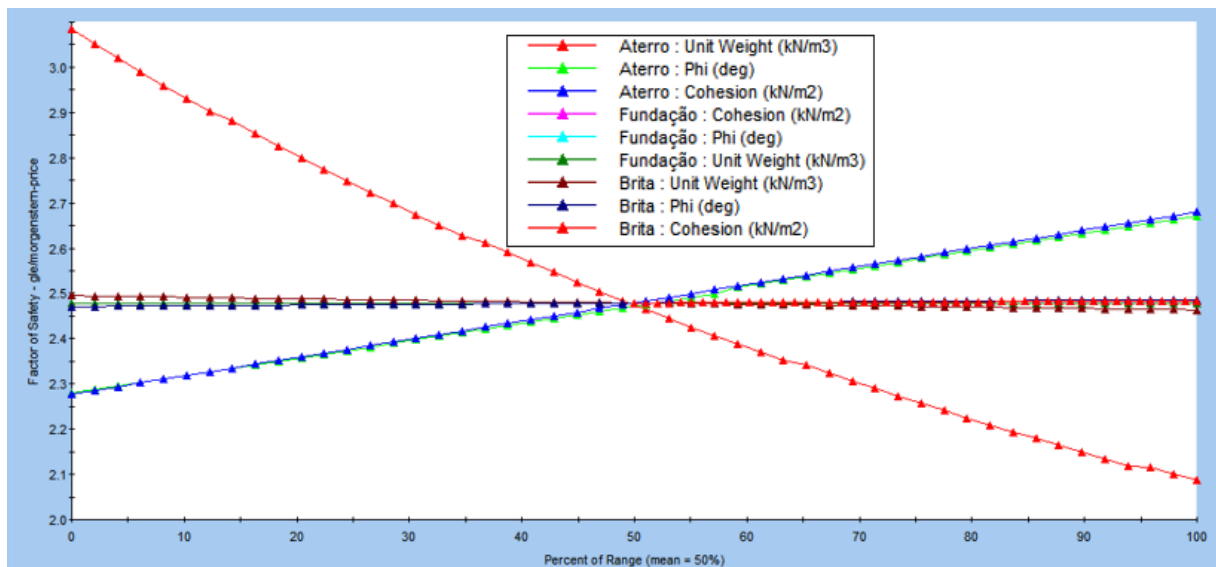
Perante a Figura 42, é possível observar que a variação dos parâmetros não torna o FS abaixo do considerado seguro por normas para jusante. O mesmo se observa à montante (Figura 43).

Figura 42 - Gráfico de sensibilidade para análise sísmica à jusante.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 43 - Gráfico de sensibilidade para análise sísmica à montante.



Fonte: Da autora (2022).

4.3.5 Resumo dos fatores de segurança perante análise normal

Na Tabela 25 segue um quadro resumo com o resultado dos fatores de segurança para cada análise, evidenciando que, em todas as análises, o FS calculado é maior que o FS mínimo.

Tabela 25 - Quadro resumo dos fatores de segurança calculados.

Situação	Talude	FS mínimo	FS calculado
<i>Fim de construção</i> Reservatório vazio	Montante e Jusante	1,30/1,30	2,31/3,22
<i>Durante a operação</i> Reservatório cheio	Jusante	1,50	1,73
<i>Perante rebaixamento rápido</i> Reservatório rebaixado	Montante	1,30	1,50
<i>Solicitação sísmica</i> Reservatório cheio	Montante e Jusante	1,10/1,10	1,50/2,41

Fonte: Da autora (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Seguem nos tópicos subsequentes as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusão

O trabalho em questão faz um compilado dos estudos necessários, aspectos construtivos essenciais e principais elementos de uma barragem. Além disso, contempla o dimensionamento de uma barragem de terra de pequeno porte, utilizando material geotêxtil como elemento de filtração em um sistema de drenagem.

A respeito das estruturas hidráulicas, o dimensionamento do extravasor, desarenador, tomada d'água e dissipador de energia, embora tenha ocorrido de maneira simplificada e preliminar, se deu maneira eficaz.

Após a análise de fluxo a partir do software Slide2, foi possível dimensionar o filtro e verificar seu correto funcionamento. Além disso, os critérios de retenção e permeabilidade, referentes ao geotêxtil escolhido para compor o filtro juntamente com a brita 0 foram assegurados, evidenciando que a escolha do material foi eficiente. O dreno de pé apresentou o comportamento esperado e, também, está atuando como protetor do geossintético.

Para as análises de estabilidade normal, foram consideradas as seguintes situações: final de construção, durante a operação, em rebaixamento rápido do nível d'água e sob solicitações sísmicas. Os quatro cenários apresentaram fatores de segurança acima no mínimo normativo, evidenciando que a estrutura está estável e correta. Um fator importante a ser discutido, é o fato de que as superfícies potenciais de ruptura não se modificaram com a presença do filtro. Esse fato pode ser explicado pela presença de geotêxtil, uma vez que suas propriedades de resistência podem auxiliar na estabilidade do filtro em particular.

Para evidenciar a importância da realização de investigações, sondagens, ensaios de campo e laboratório e prospecção referentes aos materiais e jazidas que serão utilizadas na construção do empreendimento, foram realizadas análises de sensibilidade. Foram avaliadas as quatro situações exemplificadas acima, e é evidente o quanto o FS de segurança varia significativamente junto com a variação dos parâmetros de resistência dos solos empregados. Embora nenhum FS encontrado esteja abaixo do mínimo preconizado por norma, é necessário afirmar o quanto é essencial o estudo minucioso e com qualidade da área e do entorno do empreendimento, evitando a utilização de dados e parâmetros incertos que podem culminar em rupturas e acidentes.

Por fim, o objetivo principal do trabalho, que se trata do dimensionamento de uma barragem de pequeno porte empregando geotêxtil como material filtrante em um sistema de drenagem, foi atingido com êxito.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, é aconselhável a realização da análise de tensão e deformação do barramento.

Visando evitar custos na construção do empreendimento com a utilização de materiais superdimensionados, é recomendado que sejam realizados testes de viabilidade utilizando outras dimensões de brita para a construção da espessura necessária do filtro e, também, a utilização de outros tipos de geotêxteis.

Aconselha-se também que os assuntos como critérios de colmatção e de sobrevivência do geotêxtil sejam mais explorados.

A respeito da parte hidráulica, o dimensionamento do restante das estruturas hidráulicas se torna necessário, assim como a análise de estabilidade e percolação em outras seções da estrutura.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEMANETO BÁSICO (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens:** Diretrizes para a construção de barragens. Volume VI. **Superintendência de Regulação (SRE)**, Brasília, DF. 72p, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEMANETO BÁSICO (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens:** Diretrizes para a elaboração de projetos de barragens. Volume V. **Superintendência de Regulação (SRE)**, Brasília, DF. 160p, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEMANETO BÁSICO (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens: Guia prático de pequenas barragens Volume VIII. Superintendência de Regulação (SRE)**, Brasília, DF. 126p, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens de 2018.** Brasília, DF. 54p, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens de 2021.** Brasília, DF. 68p, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Informe mineral 01TRI2021.** Superintendência de Regulação e Governança Regulatória. Brasília, DF, 2022.
- ANDRADE, V. C; FILHO, R. J. A. T. **Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de taludes em barragens: estudo de caso.** 2015. 84p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- ANDREATTI, G. A; SENA, J. C. **Estudo de drenagem com geossintético em área litorânea.** 2015. 45p. Trabalho de graduação. (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2015.
- ARAÚJO, I. M. **Análise da aplicação de materiais geossintéticos em fundações de barragens de terra.** 2021. 62p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Crhistus – Fortaleza, 2021.
- ARTIÈRES, O; OBERREITER, K; ASCHAUER, F. **Geosynthetic Systems for Earth Dams- 35 Years of Experience.** Estados Unidos, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318-1: Geossintéticos Parte 1: Termos e definições.** Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água- Requisitos.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318: Geossintéticos – Termos e definições.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10319: Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12236: Geossintéticos – Ensaio de punção estático (punção CBR).** Rio de Janeiro, 2013.

BARBOSA, C. C. **A utilização de materiais geossintéticos em barragens de terra e enrocamento.** 2016. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2016.

ATHOS ENGENHARIA. **Projetos.** Ijuí, 2023. Disponível em: <<https://athosengenharia.com.br/>>

BEIRIGO, E. A. **Comportamento filtro-drenante de geotêxteis em barragens de rejeitos de mineração.** 2005. 210p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

BURKE, J. **Barragens de Terra.** Manual sobre Pequenas Barragens de Terra. Organização das Nações Unidas para a alimentação e a agricultura. Roma, 2011.

CÂNDIDO, E. S. **Barragens de terra e enrocamento.** Notas de aula, Capítulo I, UFLA, 2022.

CÂNDIDO, E. S. **Análise inversa de ensaios geotécnicos utilizando um algoritmo genético acoplado ao método dos elementos finitos.** 2020. 135p. Tese (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

CAPUTO, H. P; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CAPUTO, H. P; CAPUTO, A. N. N; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra.** 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

CARVALHO, D. **Barragens, uma introdução para graduandos.** Nota de aula, UNICAMP, 2011.

- CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de pequenas barragens de terra para irrigação**. Lavras: Editora UFLA, 2010.
- CARVALHO, J. A. **Obras hidráulicas**. Lavras: Editora UFLA. 266p, 2019.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Apresentação das barragens**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: < <http://cbdb.rarolabs.com.br/apresentacao-das-barragens>>.
- COMITE FRANÇAIS DES GEOTEXTILES ET GEOMEMBRANES. **Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les systèmes de drainage et de filtration**. Boulogne Billancourt, 1986.
- CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo, Oficina de Textos, 1996.
- Critical slip surface search methods in slide 7.0 – A guide to Search methods in slide 7.0**, RocNews Spring, 2016.
- ECKS, J. **Aplicação da teoria do equilíbrio-limite na análise de estabilidade de talude: Estudo de caso**. 2014. 75p. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- ELETROBRÁS (Brasil). **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas S.A., 2003.
- ENGENHARIA 360. **Você sabe o que são geossintéticos?** 2022. Disponível em: < <https://engenharia360.com/geossinteticos/>>.
- MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2010.
- FEMA – Federal Emergency Management Agency. **Geotextiles in Embankment Dams – Status Report on the Use of Geotextiles in Embankment Dams – Construction and Rehabilitation**. Estados Unidos, 2008.
- GOBLA, M. J. **Geotextiles in Embankment Dams**. U. S. Department of The Interior, Bureau of Reclamatio, 2009.
- GAIOTO, N. **Barragens de terra e enrocamento**. Notas de aula, Departamento de Geotecnia – USP, 1982.
- GAIOTO, Nélío. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento**. São Carlos: Ed.USP São Carlos, Brasil, 126p, 2003.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Fluxo em solos**. Notas de aula, Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ, 2011.

- GENOVEZ, A.M. **Vazões máximas**. In: _____. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 625 p
- GOMES, M. O. G; TEIXEIRA, R. L. **Análise e desenvolvimento de projeto construtivo de uma pequena barragem de terra no córrego da cava – morrinhos/GO, com foco na segurança**. 2017. 52p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Aparecida de Goiânia, 2017.
- GUIDICINI, G; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 1983.
- HELTON, J. C.; JOHNSON, J. D.; SALLABERRY, C. J.; STORLIE, C. B. **Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis**. Reliability Engineering & System Safety, Elsevier, v. 91, n. 10-11, p. 1175–1209, 2006.
- IGS - BRASIL – Sociedade internacional de geossintéticos. **Classificação dos geossintéticos**. 2007.
- IGS - BRASIL – Sociedade internacional de geossintéticos. **Geossintéticos em Drenagem e Filtração**. 2020.
- JÚNIOR, C. L. J. **Estudo do desempenho de barreiras de geotêxtil para contenção de sedimentos carregados pelo escoamento superficial**. 2014. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.
- LIMA, H. M. F. **Fluxo bidimensional (Redes de fluxo)**. Notas de aula, Faculdade de Engenharia-UNESP, 2014.
- MACAFERRI. **Especificação técnica – MacTex H.2 Geotêxtil não tecido**. Maccaferri América Latina, julho de 2020.
- MACAFERRI. **Informe técnico Propriedades de filtração utilizando o MacTex**. Maccaferri do Brasil Ltda., Jundiaí, São Paulo, setembro de 2013,
- MANTAS BRASIL. **Manta geotêxtil**. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <<https://www.mantasbrasil.com.br/geotextil/>>.
- MARANGON, M. **Barragens de terra e enrocamento**. Notas de aula, unidade 05, Núcleo de Geotecnia - UFJF, 2004.
- MARANGON, M. **Hidráulica dos solos**. Notas de aula, unidade Núcleo de Geotecnia – UFJF, 2018.
- MARTINS, F. A. **Análise técnica do dimensionamento hidráulico hidrológico de uma barragem construída na Universidade Federal de Lavras**. 2019. 72p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

- MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2ª edição. São Paulo: Oficina de textos, 2010.
- MATOS, A. T; SILVA, D; PRUSKI, F.F. **Barragens de terra de pequeno porte**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012.
- MELLO, V. F. B. **Simpósio sobre a geotecnia da bacia do alto Paraná**. 1983. 33 p. Vol IA. São Paulo: Associação brasileira de mecânica dos solos.
- MENEZES, T. T. **Análise de percolação em barragens de terra pelo método dos elementos finitos**. 2019. 59p. Projeto de pesquisa (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2019.
- MUÑOZ, C. S. **Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis**. 2005. 120p. Pós-graduação (Mestrado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2005.
- NETTO, A. S. **Análise de estabilidade de uma barragem de terra: abordagens determinística e probabilística**. 2019. 89p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.
- ORTIZ, C. A. H. **Desempenho de geotêxteis na filtração de suspensões água-solo**. 2012. 140p. Dissertação (Mestrado em ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- PALMEIRA, E. M; **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.
- PALMEIRA, E. M; GARDONI, M. G. **Geotextiles in filtration: a state of the art review and remaining challenges**. Int. Symp. On Geosynthetics – GeoEng, Melbourne, Australia, 2000.
- PIEROZAN, R. C. **Aplicação de geomembranas em tapetes impermeáveis a montante de barragens de terra**. 2014. 183p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PORTO, R.M. **Escoamento em superfície livre: regime permanente**. São Carlos: UFSCar, 1987. 112 p. Apostila.
- QUEIROZ, G. A. **Análise de condições de fluxo em uma barragem de terra homogênea**. 2021. 24p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.
- QUEIROZ, R. C. **Geologia e geotecnia básica para Engenharia Civil**. São Paulo: Blucher, 2016.

- RIJO, M. **Estruturas hidráulicas para barragens**. Notas de aula, Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, 2017.
- RODRIGUES, M. H. R. **Análise de estabilidade e percolação através do software Slide (ROSCIENCE®)**. [Online] Effyia Escola de Engenharia, 2022. Disponível em: <<https://effyia.com.br/produto/analise-de-estabilidade-e-percolacao/>>.
- ROMANINI, A. **Introdução ao Projeto de Barragens de Terra**. 1. ed. Sinop, Mato Grosso. 2020.
- SENRA, Klinger. **Análises determinísticas e probabilísticas no Slide2**. Youtube, 16 de fevereiro de 2022. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=18safwztSNQ&t=227s>>.
- SILVA, D. S. S. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens**. 2016. 181p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- SILVA, J. P. M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de talude**. 2011. 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Geotecnia) - Universidade do Porto, Porto, 2011.
- SILVA, T. B. da. **Análise de fluxo, estabilidade e tensão-deformação de uma barragem no Agreste de Pernambuco**. 2020. 148p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.
- SOBRINHO, J. I. L. S. **Análise de estabilidade de taludes utilizando o método do equilíbrio limite e método dos elementos finitos**. 2015. 116p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2015.
- SOUZA, M. M. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC**. 2013. 139p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- TOMAZ, P. **Curso de manejo de águas pluviais**. Capítulo 88, pequenas barragens de terra. 2011.
- USBR – **Bureau of Reclamation, United States Department of Interior. Diseño de Presas Pequeñas**. México, Compañía Editorial Continental, 1967.
- VERTEMATTI, J. C. **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2015. VIANA, H. M. F. **Percolação e fluxo bidimensional**. Notas de aula, Faculdade de Tecnologia e Ciências, 2016.