



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Câmpus Anápolis

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DE UMA BARRAGEM UTILIZANDO
O SOFTWARE GEOSTUDIO

LUIZ FILIPE DA SILVA

ORIENTADORA: Prof. D.Sc. ANGELA QUEIROZ

ANÁPOLIS
2025

LUIZ FILIPE DA SILVA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DE UMA BARRAGEM UTILIZANDO
O SOFTWARE GEOSTUDIO**

Trabalho de Conclusão do Curso I I de Engenharia Civil da
Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Campus Anápolis, como requisito
parcial para conclusão de curso.

Orientadora: Prof. D.Sc. ANGELA QUEIROZ

ANÁPOLIS, 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Luiz Filipe da.

S586a Análise de estabilidade do talude de uma barragem utilizando o software GeoStudio./ Luiz Filipe da Silva. – Anápolis: IFG, 2025.
41 f. il. color.

Orientador: Prof^ª. Dra. Angela Custodia Guimarães Queiroz.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Anápolis – Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade, 2025.

1. Barragens. 2. estabilidade de taludes. 3. GeoStudio.
4. fluxo de água.

I. Queiroz, Ângela Custódia Guimarães (orient.).

II. Título.

CDD 624

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Claudineia Pereira de Abreu CRB1/1956
IFG Campus Anápolis



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

ATA Nº 10/2024.2

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

Aos 13 dias do mês de março do ano de dois mil e vinte cinco, às 14 horas e 30 minutos, no campus Anápolis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, foi realizada a sessão pública de apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Graduando **Luiz Filipe da Silva** (matrícula 20201060130288) do curso de Engenharia Civil da Mobilidade. A banca foi composta pelos seguintes membros: Angela Custódia Guimarães Queiroz, Maria Tâmara de Moraes Guimarães Silva e Alexia Regine Costa Silva Meira, sob a presidência da primeira. O trabalho de conclusão de curso tem como título “**Análise de estabilidade dos taludes de uma barragem utilizando o software Geostudio**”, da área de Geotecnia, sob orientação da Profa. Angela Custódia Guimarães Queiroz. Após a apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso 2, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 8,0 (oito).

Encerra-se a presente sessão às 16 horas. Eu, Prof. Angela Custódia Guimarães Queiroz, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca e pelo graduando.

(assinado eletronicamente)

Profa. Angela Custódia Guimarães Queiroz

Profa. Maria Tâmara de Moraes Guimarães Silva

Documento assinado digitalmente



ALEXIA REGINE COSTA SILVA MEIRA
Data: 17/03/2025 13:36:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Alexia Regine Costa Silva Meira

Luiz Filipe da Silva
(Graduando)

Documento assinado eletronicamente por:

- Maria Tamara de Moraes Guimaraes Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/03/2025 15:18:37.
- Luiz Filipe da Silva, 20201060130288 - Discente, em 14/03/2025 12:23:06.
- Angela Custodia Guimaraes Queiroz, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 14/03/2025 12:09:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/03/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 627178
Código de Autenticação: 833d8c4bae



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Pedro Ludovico, s/ nº, S/N, Reny Cury, ANÁPOLIS / GO, CEP 75131-457
(62) 3703-3373 (ramal: 3373)



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Luiz Filipe da Silva

Matrícula: 20201060130288

Título do Trabalho: Análise De Estabilidade Do Talude De Uma Barragem Utilizando O
Software Geostudio

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Documento assinado digitalmente

LUIZ FILIPE DA SILVA

Data: 09/04/2025 20:19:51-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Anápolis-GO, 09/04/2025.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Dedico a todos que fizeram e fazem parte
de minha vida, em especial minha família.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade dos taludes de uma barragem homogênea construída com uma areia-argilosa. Para isso, foram realizadas simulações numéricas utilizando o software GeoStudio. Os Fatores de Segurança Mínimos foram determinados nas diferentes fases do projeto, permitindo a análise dos métodos adotados. O estudo empregou os métodos de equilíbrio limite de *Bishop*, *Fellenius* e *Morgenstern & Price*, disponíveis na ferramenta mencionada. Os parâmetros dos materiais do corpo da barragem foram definidos com base nos dados fornecidos pela orientadora, referentes ao solo das ombreiras da barragem Ribeirão do João Leite. Já as propriedades dos materiais do filtro e da fundação foram obtidas a partir da literatura técnica. Nas simulações numéricas, foram considerados parâmetros como permeabilidade, peso específico natural, ângulo de atrito e coesão. A seção escolhida para o estudo foi projetada de acordo com a literatura, considerando as diretrizes para uma barragem de terra homogênea.

Palavras-chave: Barragens. Estabilidade de Taludes. GeoStudio. Fluxo de água.

ABSTRACT

This study aims to analyze the stability of the slopes of a homogeneous dam built with sand-clay material. For this purpose, numerical simulations were performed using the GeoStudio software. The Minimum Safety Factors were determined in the different phases of the project, allowing the analysis of the methods adopted. The study used the limit equilibrium methods of Bishop, Fellenius and Morgenstern & Price, available in the aforementioned tool. The parameters of the materials of the dam body were defined based on the data provided by the supervisor, referring to the soil of the abutments of the Ribeirão do João Leite dam. The properties of the filter and foundation materials were obtained from the technical literature. In the numerical simulations, parameters such as permeability, natural specific weight, friction angle and cohesion were considered. The section chosen for the study was designed according to the literature, considering the guidelines for a homogeneous earth dam.

Keywords: Dams. Slope stability. GeoStudio. Water flow.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
ICOLD	Comissão Internacional de Grandes Barragens
Hm	Pressão hidrostática
Hj	Pressão a jusante
U	Subpressão
FS	Fator de segurança
N	Força normal
c'	Coesão efetiva
l	Largura da lamela, paralela à base
Φ	Ângulo de Atrito
Φ'	Ângulo de resistência ao corte
P	Peso próprio da lamela
θ	Ângulo do centro imaginário do arco até o centro da base da lamela
μ	Pressão neutra
Δx	Largura da lamela, paralela ao topo.
m/s	Metro por segundo
N.A.J	Nível de Água a Jusante
N.A.M	Nível de Água a Montante
Kg/m ³	Quilo grama por metro cúbico
KN/m ³	Quilo Newton por metro cúbico
Kpa	Quilo Pascal

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Balanço de regularização.....	07
Figura 2	Amortecimento de onda cheia.....	08
Figura 3	Barragens de concreto.....	09
Figura 4	Exemplo de barragem homogênea.....	09
Figura 5	Principais elementos de uma barragem de terra homogênea	10
Figura 6	Barragens de terra e de enrocamento.....	12
Figura 7	Barragens de terra – enrocamento.....	12
Figura 8	Barragens de enrocamento com membrana de concreto.....	13
Figura 9	Barragem de Oahe, EUA.....	14
Figura 10	Representação lateral da evolução de uma brecha numa barragem.....	15
Figura 11	Etapas de desenvolvimento do fenômeno Pipping.....	15
Figura 12	Representação das forças exercidas sobre uma barragem.....	16
Figura 13	Redes de fluxo em barragens de seção homogênea.....	19
Figura 14	Redes de fluxo turbulento.....	20
Figura 15	Método das lamelas.....	21
Figura 16	Forças na lamela genérica.....	21
Figura 17	Lamela de Fellenius.....	22
Figura 18	Lamela de Bishop.....	23
Figura 19	Lamela de <i>Morgenstern-Price</i>	24
Figura 20	Interface do programa GeoStudio Estudantil 2024.2.1.....	25
Figura 21	Localização da ombreira.....	26
Figura 22	Geometria da Barragem.....	29
Figura 23	Poropressões.....	30
Figura 24	Fluxo de água.....	31
Figura 25	Fator de Segurança no Final de Construção a Jusante pelo método de <i>Bishop</i>	32
Figura 26	Fator de Segurança no Final de Construção no montante pelo método de <i>Bisho</i>	33
Figura 27	Fator de Segurança no Final de Construção a jusante pelo método de <i>Fellenius</i>	33
Figura 28	Fator de Segurança no Final de Construção no montante pelo método de <i>Fellenius</i> .	34
Figura 29	Fator de Segurança no Final de Construção a Jusante pelo método de <i>Morgentern-Price</i>	34

Figura 30	Fator de Segurança no Final de Construção no Montante pelo método de <i>Morgentern-Price</i>	35
Figura 31	Fator de Segurança no Regime de Operação a Jusante pelo método de <i>Bishop</i>	35
Figura 32	Fator de Segurança no Regime de Operação a Jusante pelo método de <i>Fellenius</i>	36
Figura 33	Fator de Segurança no Regime de Operação a Jusante pelo método de <i>Morgentern-Price</i>	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.....	17
Tabela 2	Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	17
Tabela 3	Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.....	18
Tabela 4	Parâmetros do solo.....	26
Tabela 5	Peso específico de solos arenosos.....	27
Tabela 6	Parâmetros do filtro.....	27
Tabela 7	Peso específico relativo a materiais rochosos.....	28
Tabela 8	Resistência típica ao cisalhamento da rocha intacta.....	28
Tabela 9	Parâmetros da fundação.....	28
Tabela 10	Fator de Segurança obtidos no final da construção.....	32
Tabela 11	Fator de Segurança obtidos no regime de operação.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO GERAL	6
2.1 OBJETIVO ESPECÍFICOS	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1 BARRAGENS.....	7
3.2 TIPOS BARRAGENS.....	8
3.2.1 BARRAGEM DE CONCRETO.....	8
3.2.2 BARRAGEM HOMOGÊNEA.....	9
3.2.2.1 ELEMENTOS DE BARRAGEM HOMOGÊNEA.....	10
3.2.3 BARRAGEM DE ENROCAMENTO.....	11
3.2.3.1 BARRAGEM DE TERRA E ENROCAMENTO	12
3.2.3.2 BARRAGEM DE ENROCAMENTO E FACE DE CONCRETO	12
3.3 CRITÉRIOS DE ESCOLHAS	13
3.4 RUPTURA DE BARRAGENS.....	14
3.4.1 GALGAMENTO.....	14
3.4.2 <i>PIPPING</i>	15
3.3.2 DESLIZAMENTO	16
3.4 FATOR DE SEGURANÇA	17
3.5 PROGRAMA GEOSTUDIO.....	18
3.6 ÁGUA NO SOLO	18
3.6.1 FLUXO ATRAVÉS DE MEIOS POROSOS.....	19
3.7 MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE	20
3.7.1 MÉTODO FELLENIOUS.....	22
3.7.2 MÉTODO DE BISHOP	23
3.7.3 MÉTODO DE <i>MORGENSTERN-PRICE</i>	24
4. METODOLOGIA	25
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS	25
4.2 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA BARREGEM	29
4.3 ETAPAS DE ANÁLISES	29
5. ANÁLISE E RESULTADOS	30
5.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM UTILIZANDO O SOFTWARE GEOSTUDIO (<i>SLOPE/W</i>).....	31
5.2.1 FINAL DA CONSTRUÇÃO	31

5.2.2 REGIME PERMANENTE DE OPERAÇÃO	35
6. CONCLUSÃO	37
7. REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de taludes é uma etapa fundamental em projetos de engenharia geotécnica, especialmente em obras como barragens, essa análise tem como objetivo avaliar o risco de deslizamentos ou rupturas, garantindo a segurança das estruturas e das áreas adjacentes. Para isso, são utilizados métodos analíticos e numéricos que consideram as propriedades geotécnicas do solo, as condições de carregamento e os níveis de água subterrânea.

O software GeoStudio, amplamente utilizado por engenheiros geotécnicos, oferece um conjunto de ferramentas robustas para a simulação e análise de estabilidade de taludes. Um dos módulos mais conhecidos, o *Slope/W*, permite a avaliação da segurança de taludes por meio de métodos de equilíbrio limite, além de possibilitar a consideração de diferentes condições de carregamento e cenários hidrológicos. Com sua interface intuitiva e integração com outros módulos da suíte GeoStudio, como o *Seep/W*, o software se destaca por fornecer resultados confiáveis e visualmente claros, auxiliando na tomada de decisões técnicas com maior precisão.

As barragens são estruturas construídas para armazenar e controlar o fluxo de água, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento e gestão dos recursos hídricos em bacias fluviais. São projetadas para variedade de funções, como irrigação, geração de energia hidrelétrica, abastecimento de água, retenção de resíduos minerais e industriais, controle de enchentes e lazer. Essas construções são essenciais para a infraestrutura de um país, garantindo a disponibilidade contínua de água e energia (ICOLD, 2024).

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo é realizar uma análise da estabilidade do talude de uma barragem homogênea, por meio de simulações numéricas utilizando o software Geostudio, especificamente o módulo *Slope/W* e *Seep/W*. Além disso, será feita uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos de análise de estabilidade de taludes de *Fellenius*, *Bishop* e *Morgenstern-Price* ambos amplamente utilizados em geotecnia para avaliar a resistência ao deslizamento.

2.1 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica detalhada sobre barragens e estabilidade de talude.

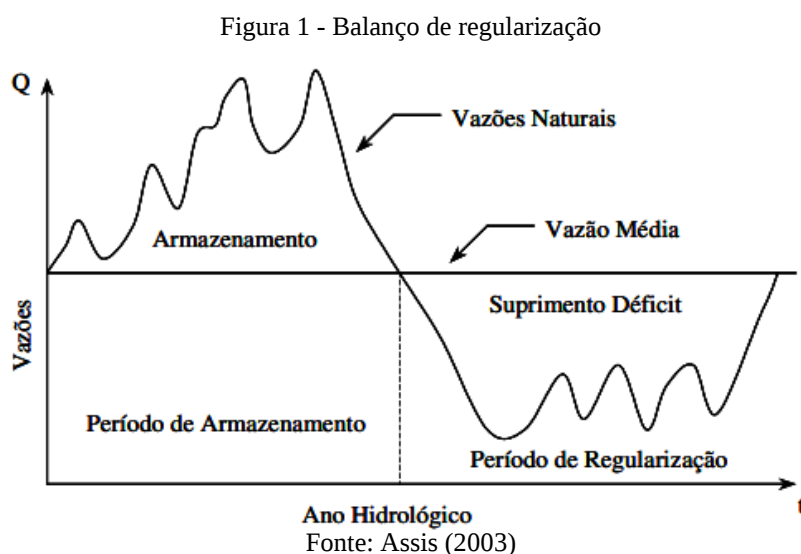
- Comparar os fatores de segurança obtidos através do módulo *Slope/W* do software *Geostudio* para os métodos *Bishop*, *Fellenius* e *Morgenstern-Price*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BARRAGENS

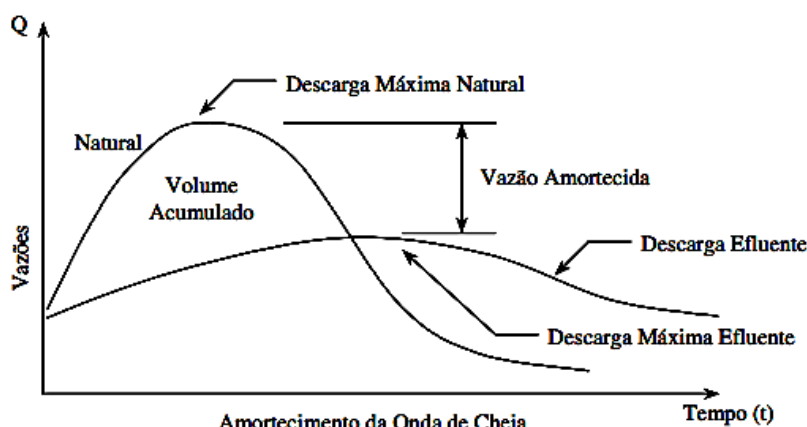
A *International Commission on Large Dams* define uma barragem como uma estrutura construída para conter ou controlar água para diversos propósitos, como controle de inundações, fornecimento de água, geração de energia hidroelétrica, irrigação, navegação e controle da poluição. As barragens podem variar significativamente em tamanho e complexidade, desde pequenas estruturas de terra até grandes projetos de concreto. Elas desempenham um papel crucial na gestão dos recursos hídricos em todo o mundo (ICOLD, 2011).

As barragens podem ser destinadas a dois propósitos principais: regularização e retenção. Barragens de regularização têm como finalidade principal ajustar e controlar o regime hidrológico de um rio. Elas armazenam água nos períodos em que a vazão de entrada é maior do que a demanda, para posterior utilização durante os períodos em que a vazão é insuficiente para suprir a demanda, assim mantendo um equilíbrio no fluxo hídrico. Essa função, representada de forma esquemática na Figura 1, permite diminuir a variação das vazões naturais durante o primeiro período e, no segundo período, assegurar vazões de saída que excedem as vazões naturais (COSTA, 2012).



As barragens de contenção têm o propósito de reter água temporariamente ou acumular sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração. Quando se trata de retenção de água, seu objetivo principal é mitigar o impacto das enchentes, amortecendo a onda e evitando inundações. Como ilustrado na Figura 2, a onda de cheia é temporariamente retida e liberada de forma controlada, garantindo que a vazão liberada não resulte em danos a jusante (COSTA,2012).

Figura 2 - Amortecimento de onda cheia



Fonte: Assis (2003)

3.2 TIPOS BARRAGENS

Existem vários tipos de barragens, cada uma projetada para atender a diferentes necessidades e condições específicas do local. Podendo ser classificados em função do tipo de material como homogênea, mista, de concreto ou de enrocamento (COSTA,2012).

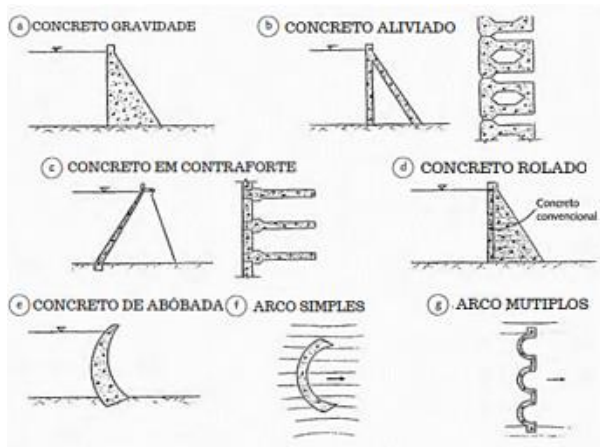
3.2.1 BARRAGEM DE CONCRETO

Construída principalmente com concreto, essa barragem é adequada para retenção de grandes volumes de água. Elas podem ser do tipo gravidade onde a própria massa da estrutura resiste à pressão da água. De arco onde a forma curva da barragem distribui as cargas para os lados ou de contraforte, onde são incorporados para resistir à pressão da água como ilustrado na Figura 3 (COSTA, 2012).

Barragens de gravidade dependem de seu próprio peso para suportar a pressão da água. São comuns em locais onde há abundância de materiais como concreto ou pedra, e onde o solo é estável e firme. Já a barragem em arco possui uma forma curva, que distribui a pressão da

água lateralmente, diferentemente da barragem de gravidade, que direciona a pressão para baixo. Esse tipo é frequentemente utilizado em vales estreitos ou terrenos rochosos. Por fim, a barragem de contraforte é semelhante à de arco, mas incorpora pilares ou contrafortes para dar suporte adicional, possibilitando a construção de barragens mais altas em locais onde o solo não é suficientemente forte para suportar a pressão da água (COSTA, 2012).

Figura 3 - Barragens de concreto

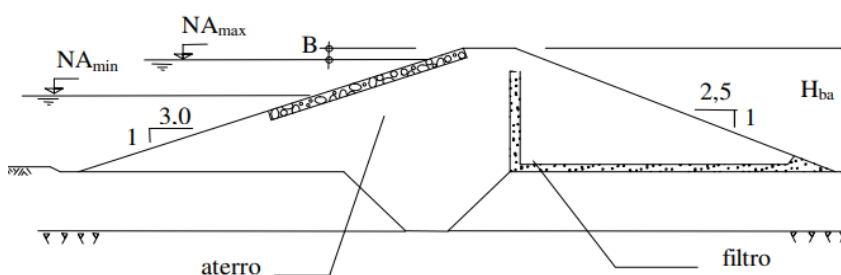


Fonte: Costa (2012)

3.2.2 BARRAGEM HOMOGÊNEA

É um tipo de barragem construída principalmente com predominância de um único material embora possam ocorrer elementos diversificados, como filtros, rip-rap etc. Esse tipo de barragem é projetado para ser relativamente uniforme em toda a sua estrutura, o que contribui para sua estabilidade e resistência. A Figura 4 mostra a seção típica de barragem, localizada no Brasil. Apesar de contar com drenagem interna, proteção de taludes com “rip-rap” e a presença de ensecadeiras, é classificada como homogênea (COSTA,2012; CARVALHO, 2011).

Figura 4 - Exemplo de barragem homogênea.

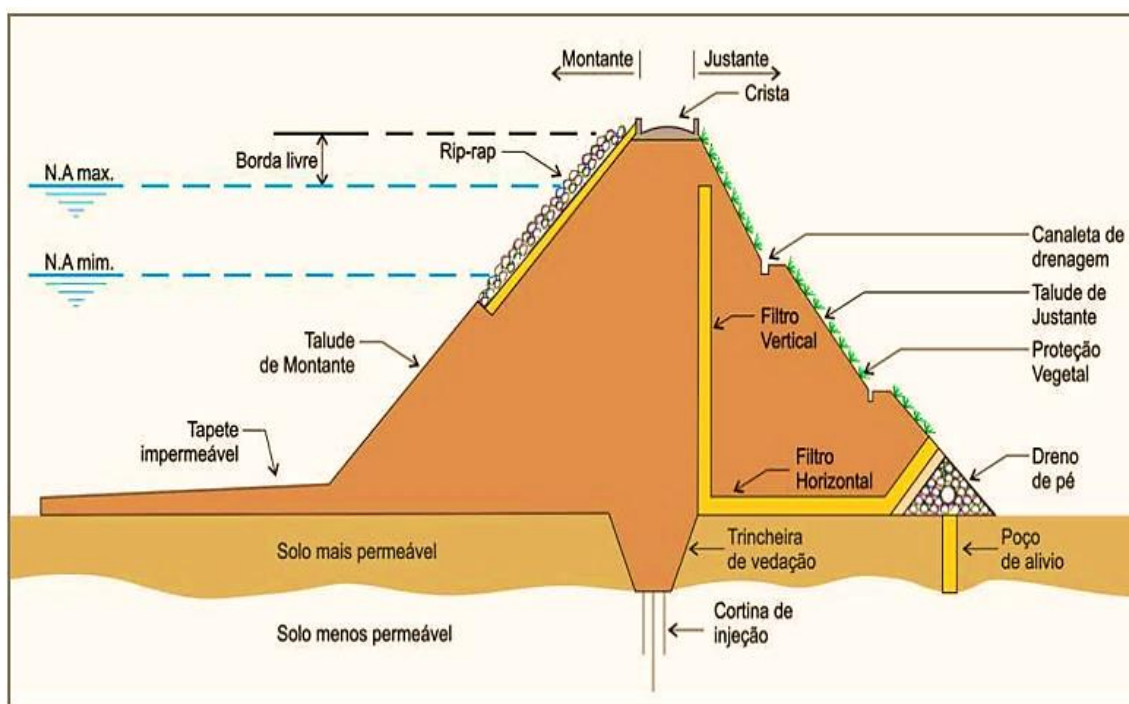


Fonte: Assis (2003)

3.2.2.1 ELEMENTOS DE BARRAGEM HOMOGÊNEA

De acordo com Carvalho (2011), uma barragem é classificada como de grande porte quando sua altura ultrapassa os 15 metros. Adicionalmente, estruturas com altura entre 5 e 15 metros que armazenem mais de 3 milhões de m³ de água também se enquadram na categoria de grandes barragens. A crista é o primeiro componente da barragem, representando o ponto mais elevado da estrutura. Sua altura deve coincidir com o nível máximo da água, acrescida de uma margem de segurança, chamada borda livre. Mesmo em barragens menores, a largura mínima recomendada para a crista é de 3 metros, ilustrado na Figura 5 (CARVALHO, 2011).

Figura 5 - Principais elementos de uma barragem de terra homogênea



Fonte: Carvalho (2011)

- a) **Crista:** a estrutura deve incluir um sistema de drenagem, que permita o escoamento adequado das águas pluviais, garantindo a segurança e evitando erosões ou acúmulo de água (CARVALHO, 2011).
- b) **Borda livre:** O espaço vertical entre a crista da barragem e o nível máximo da água, é projetado para oferecer uma margem de segurança adicional contra o transbordamento. Essa medida protege de fatores como o aumento do volume de água devido às chuvas intensas, a formação de ondas causadas pelo vento e outros fenômenos que podem aumentar o nível da água passageiramente. Ao

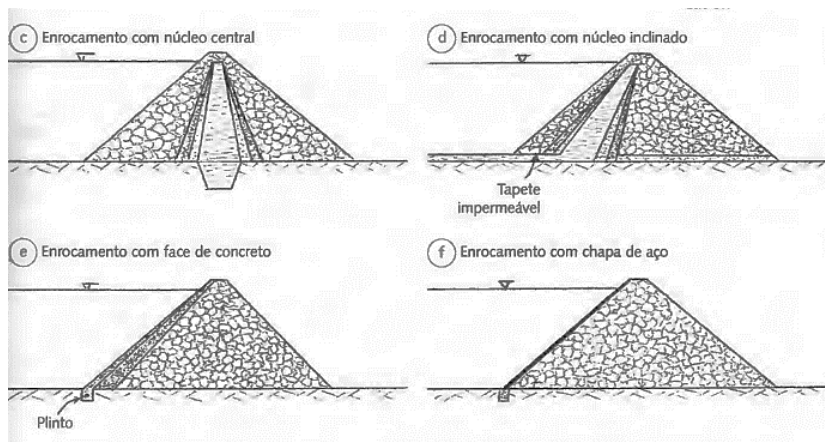
evitar que a água ultrapasse a crista, essa precaução protege o talude de jusante contra erosões e danos estruturais que poderiam comprometer a estabilidade da barragem (CARVALHO, 2011).

- c) Talude de montante: é voltado para o lado do reservatório, está em contato direto com a água armazenada. Sua função é suportar a pressão hidrostática gerada pela água. Dependendo do projeto, esse talude pode ser protegido com revestimentos impermeáveis, como rochas ou concreto, para evitar infiltrações que comprometam a segurança da estrutura (CARVALHO, 2011)
- d) Rip-rap: sistema de proteção contra a ação das ondas que se formam no reservatório e das chuvas que podem se acumular na crista (CARVALHO, 2011).
- e) Talude de jusante: é a face localizada no lado oposto ao reservatório, oposta ao talude de montante (CARVALHO, 2011).
- f) Trincheira de Vedação: escavação de trincheiras que atravessam as camadas superficiais do solo, preenchidas com materiais argilosos compactados, é o método mais comum para bloquear o fluxo de água sob a fundação da barragem (CARVALHO, 2011).
- g) Filtro horizontal e vertical: sistema de drenagem projetado para prevenir problemas futuros, atuando como uma proteção eficaz (CARVALHO, 2011).
- h) Proteção vegetal: destacam-se o uso de revestimentos como geotêxteis, ou vegetação resistente que ajudam a inibir a energia da água, diminuindo sua velocidade e evitando a degradação do solo. Além disso, sistemas de drenagem superficial e subterrânea podem ser instalados para controlar o fluxo de água, evitando que grandes volumes se acumulem e causem danos ao talude (CARVALHO, 2011).
- i) Dreno de Pé: coleta toda a água que percola através dos filtros e proteções vegetais, chegando ao pé de jusante da barragem, e a direciona de volta para o rio, a jusante da estrutura (CARVALHO, 2011).

3.2.3 BARRAGEM DE ENROCAMENTO

Também conhecida como barragem de pedra, é composta por grandes pedras ou blocos de rocha empilhados e compactados ilustrado na Figura 6. A estrutura é então coberta com uma camada de solo ou concreto para evitar erosão (COSTA,2012).

Figura 6 - Barragens de terra e de enrocamento

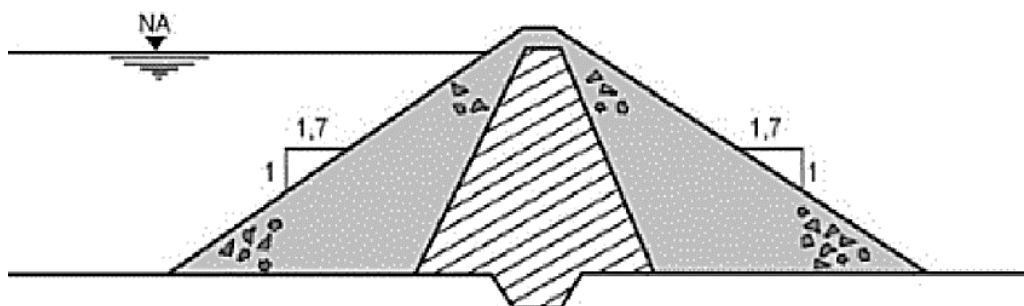


Fonte: Costa (2012).

3.2.3.1 BARRAGEM DE TERRA E ENROCAMENTO

É feita por um núcleo argiloso, que proporciona a função de vedação à barragem, e enrocamento, que são pedaços de rocha ou cascalho que garantem a resistência necessária à estrutura mostrado na Figura 7. Este tipo de barragem permite a construção de taludes mais íngremes. A fundação deve ser mais estanque que a fundação das barragens de terra, pois nestas o caminho de percolação é grande (SOUZA, 2013).

Figura 7 - Barragens de terra – enrocamento



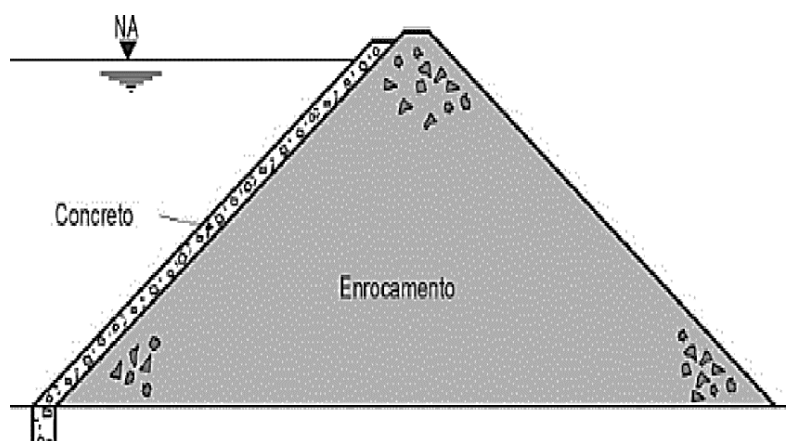
Fonte: Massad (2010).

3.2.3.2 BARRAGEM DE ENROCAMENTO E FACE DE CONCRETO

A barragem é composta por enrocamentos e revestida com placas de concreto no talude de montante, como ilustrado na Figura 8. É crucial prestar atenção especial às juntas entre as

placas de concreto, pois elas são apoiadas em uma base deformável de enrocamento, que pode sofrer recalques consideráveis durante o primeiro enchimento do reservatório. Além disso, é necessário garantir a estanqueidade na conexão entre a face de concreto e a fundação, assegurando que não ocorram infiltrações nessa área (SOUZA, 2013).

Figura 8 - Barragens de enrocamento com membrana de concreto



Fonte: Massad (2010).

3.3 CRITÉRIOS DE ESCOLHAS

Carvalho (2011) menciona que o tipo de barragem será influenciado pelos materiais disponíveis, pelas particularidades geotécnicas e geológicas, e pela topografia do local. Outros fatores importantes para a seleção de uma barragem, conforme a literatura, podem incluir:

- a) Natureza das fundações: barragens de enrocamento e de concreto é exclusivamente executada sobre construções de fundações rochosas, enquanto as barragens de terra podem ser assentadas sobre fundações em solo (CARVALHO, 2011);
- b) Disponibilidade de solo ou rocha: estudo originando das escavações do solo indispensáveis, para a análise de qualidades adequadas, conforme o fluxo compatível com a organização de construção proposta no projeto (CARVALHO, 2011);
- c) Condições climáticas: a ocorrência de períodos chuvosos duradouros sobrecarrega significativamente a construção de aterros do solo compactado ou núcleo de argila, pois reduz o avanço das obras (CARVALHO, 2011).

Um local pode ser considerado apropriado para a construção de uma barragem de terra homogênea quando a análise de campo revelar que as rochas estão a grandes profundidades na área estudada. Esse tipo de barragem requer menor inclinação nos taludes de montante e jusante, resultando em volumes maiores de material, sendo geralmente utilizado para barragens de pequenas e médias alturas (CARVALHO, 2011).

3.4 RUPTURA DE BARRAGENS

3.4.1 GALGAMENTO

Overtopping termo inglês que descreve de forma mais concisa o fenômeno de transbordamento em barragens. Esse tipo de incidente ocorre quando a água passa o nível do coroamento da barragem como exemplo ilustrado na Figura 9, podendo ser causado por ondas formadas na albufeira, enchentes ou até mesmo por sismos (JÓNATAS, 2013).

Figura 9 - Barragem de Oahe, EUA.



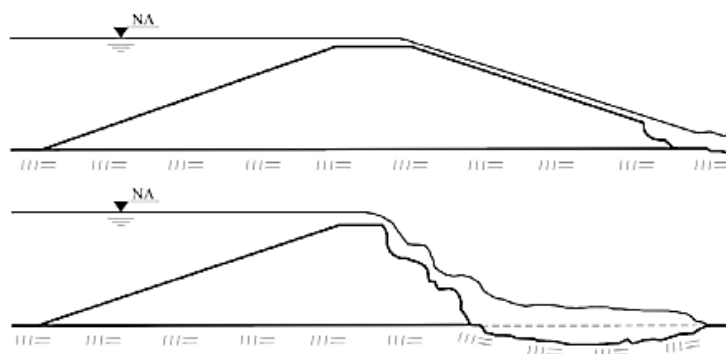
Fonte: Google

Em barragens de aterro, o transbordamento provoca a erosão do coroamento e do talude de jusante, comprometendo a estrutura. Esse processo cria uma área frágil, o que pode resultar no colapso localizado da barragem. Com o agravamento da erosão, o corte na estrutura pode se aprofundar até atingir a base do aterro. Embora a localização exata da área frágil seja incerta, é comum que o escoamento se concentre no centro da barragem, onde a altura da água durante o transbordamento é maior, o que geralmente leva ao início da ruptura nessa região. Além disso, uma compactação inadequada em qualquer parte do aterro pode criar um ponto de fragilidade, tornando-se o local preferencial para o desenvolvimento de uma brecha (JÓNATAS, 2013).

O mecanismo de rupturas ilustrado na Figura 10, pode-se observar que a erosão pode começar em qualquer ponto do talude de jusante, mas frequentemente inicia-se na base da barragem. Quando uma fissura surge na superfície, uma pequena cascata se forma, criando um

buraco no local onde a água atinge o solo. Esse buraco tende a aumentar, expandindo-se lateralmente e na direção montante, resultando na formação de uma brecha (POWLEDGE, 1988).

Figura 10 - Representação lateral da evolução de uma brecha numa barragem.

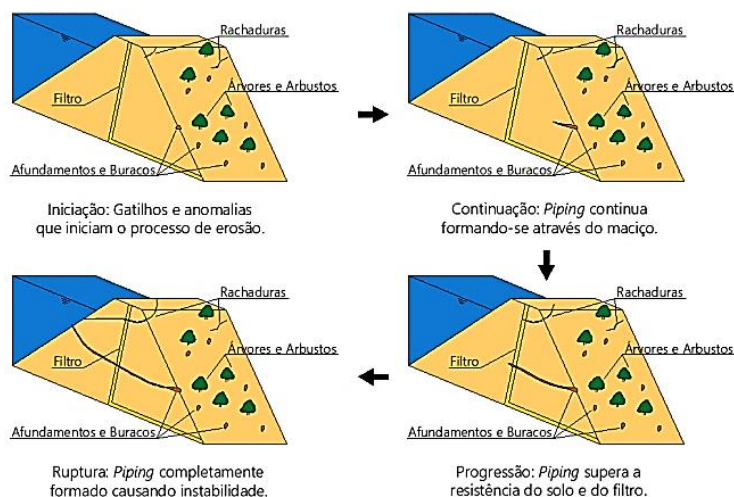


Fonte: Jónatas (2013)

3.4.2 PIPPING

As roturas por *piping* é causada pela erosão do solo devido à percolação da água através do corpo ou da fundação da barragem. É um fenómeno que ocorre por erosão onde tem a formação de um “tubo”, determinando o transporte de solo através do maciço de terra compactada de uma barragem. Este canal busca aumentar o seu diâmetro à medida que a água percola pelo solo compactado. A dimensão do canal aberto pelo escoamento aumenta, e o seu poder erosivo são igualmente incrementados. Este processo progressivo causa geralmente que a secção do “tubo” ganhe dimensões que os materiais contidos acabam por entrar em colapso, formando um único canal a exposto ilustrado na Figura 11 (JÓNATAS, 2013).

Figura 11 - Etapas de desenvolvimento do fenómeno Pipping.



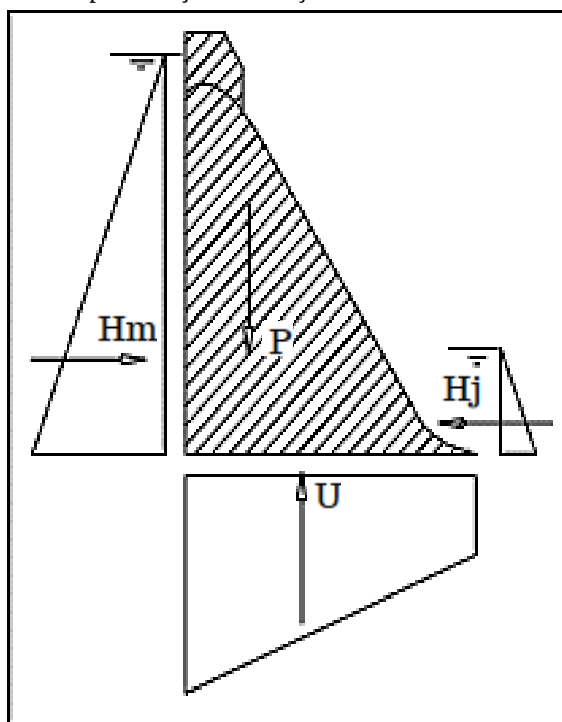
Fonte: Soares (2020)

3.3.2 DESLIZAMENTO

Em casos de rupturas por deslizamento, grandes porções da barragem deslocam-se para jusante, sendo que o plano de deslizamento pode ocorrer tanto no interior do corpo da barragem quanto em sua fundação. Esse tipo envolve o movimento de massas de solo ou material estrutural ao decorrer de uma superfície de ruptura, que pode se gerar devido a forças excessivas ou à perda de resistência dos materiais (JÓNATAS, 2013).

A barragem está vulnerável a diversas ações mecânicas e hidrostáticas, conforme representado na Figura 12. Nesta Figura, **H_m** indica a pressão hidrostática atuando na parte montante da barragem, resultante do peso da água armazenada. Essa pressão empurra a barragem para jusante. Por outro lado, **H_j** representa a pressão da água a jusante, que se opõe a **H_m** e transmite como uma força de resistência, ajudando a prevenir o deslizamento. O peso da estrutura da barragem, representado pela notação **P**, exerce uma força para baixo, contribuindo para a estabilidade da barragem, enquanto a subpressão **U**, que é causado pela água infiltrada na fundação, pode diminuir a força de atrito entre a barragem e sua base, favorecendo o deslizamento. Quando essas forças se desequilibram, ocorre a falha por deslizamento (JÓNATAS, 2013).

Figura 12 - Representação das forças exercidas sobre uma barragem



Fonte: Filho e da Gama (2003).

3.4 FATOR DE SEGURANÇA

As análises convencionais de segurança muitas vezes desconsideram as deformações naturais que ocorrem em taludes ou encostas. O fator de segurança (FS) está diretamente relacionado à resistência ao cisalhamento do material do talude, sendo calculado como a razão entre a resistência e a resistência mobilizada. Dessa forma, quanto maior o valor de FS, maior é a segurança contra a ruptura. No entanto, em encostas, a variabilidade dos materiais naturais pode diminuir significativamente a segurança, aumentando a probabilidade de uma ruptura (NBR 11682, 2009).

Os fatores de segurança (FS) abordados na NBR 11682 visam compensar as incertezas naturais presentes nas diferentes fases de projeto e execução de obras. De acordo com os riscos envolvidos, o projeto deve ser inicialmente classificado em um dos níveis de segurança estabelecidos. Essa classificação considera, conforme a Tabela 1, o potencial de perda de vidas humanas e, conforme a Tabela 2, os danos materiais e ambientais possíveis (NBR 11682, 2009).

Tabela 1 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residências ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Fonte: NBR 11682 (2009)

Tabela 2 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grandes porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: NBR 11682 (2009)

É essencial avaliar o fator de segurança, levando em consideração a finalidade específica da obra. Com base nessa definição, são obtidos os parâmetros reais do local, o que permite aplicar os graus de segurança indicados pela NBR 11682, conforme descrito na tabela 3 correspondentes (COSTA, 2015).

Tabela 3 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos a vidas humanas Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: NBR 11682 (2009)

3.5 PROGRAMA GEOSTUDIO

Na engenharia, diversos programas computacionais são utilizados para auxiliar em análises e projetos. Dentro desse contexto, o software *GeoStudio* 2024 foi empregado como ferramenta para a análise de estabilidade de taludes (SOARES, 2015).

O módulo *Slope/W*, presente no programa, aplica a teoria do equilíbrio-limite para calcular o fator de segurança de taludes compostos por solo ou rocha. Esse cálculo pode ser realizado utilizando diferentes métodos, como Fellenius, Bishop Simplificado, entre outros (Soares, 2015).

O módulo *SEEP/W* é uma ferramenta avançada utilizada para análise de fluxo de água em solos. Ele permite simular a movimentação de água a montante e jusante para definir as condições de contorno, proporcionando uma compreensão detalhada dos processos hidrológicos. Com recursos que incluem a modelagem de perfis de permeabilidade e a localização estratégica de piezômetros (ANDREETTA, 2019)

3.6 ÁGUA NO SOLO

A água frequentemente preenche a maior parte ou até a totalidade dos vazios do solo. Quando submetida a diferenças de potencial, ela se desloca internamente, gerando diversas tensões. O estudo da percolação da água nos solos é essencial, pois influencia inúmeros problemas práticos, como a análise da estabilidade. Isso ocorre porque a tensão efetiva está

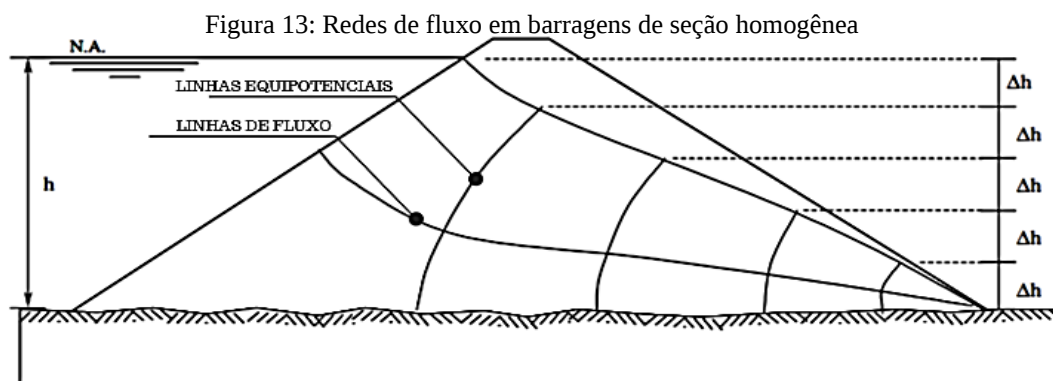
diretamente ligada à pressão neutra, que, por sua vez, depende das tensões geradas pelo movimento da água no solo (PINTO, 2006).

3.6.1 FLUXO ATRAVÉS DE MEIOS POROSOS

A teoria de fluxo em meios porosos é uma ferramenta fundamental nas análises de engenharia, pois permite estimar tanto a quantidade de água que percola através ou sob uma barragem quanto a distribuição das pressões de água (equipotenciais). Para o caso de fluxo bidimensional, comumente considerado em barragens de terra e enrocamento, é possível utilizar a forma simplificada da Equação 1 de Laplace (ASSIS, 2003).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

A equação mencionada descreve duas famílias de curvas que se cruzam em ângulos retos, formando estruturas chamadas de redes de fluxo, que têm a aparência de figuras "quadradas". Uma dessas famílias de curvas é composta pelas chamadas linhas de fluxo, enquanto a outra é formada pelas equipotenciais como mostra a Figura 13 (ASSIS, 2003).



Fonte: Assis (2003)

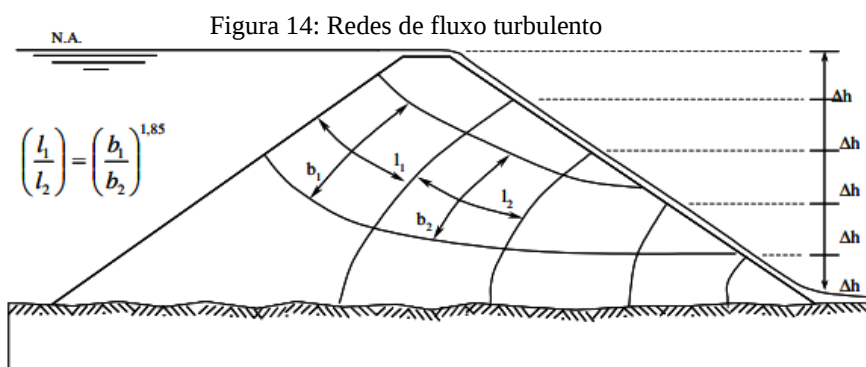
As linhas de fluxo indicam o trajeto percorrido pela água ao longo de uma seção transversal do meio, representando o movimento real das partículas de água. Já as linhas equipotenciais conectam pontos que possuem o mesmo nível de energia ou carga hidráulica, mostrando regiões onde o potencial hidráulico é constante. A combinação dessas curvas permite analisar o comportamento do fluxo subterrâneo, a distribuição de pressões e a percolação da

água, sendo especialmente útil em projetos de barragens e em estudos de estabilidade de encostas.

3.6.2 REDE DE FLUXO

O fluxo da água é considerado unidimensional quando segue sempre a mesma direção, como ocorre nos permeâmetros de carga constante e variável. Quando a movimentação da água pode ocorrer em qualquer direção, o fluxo passa a ser tridimensional, como no caso da migração para um poço. Já no fluxo bidimensional, as partículas de água percorrem trajetórias curvas dentro de planos paralelos. Esse tipo de fluxo é frequente em projetos de engenharia e tem grande relevância na estabilidade de barragens, sendo, por isso, amplamente estudado (PINTO, 2006).

Devido às flutuações de velocidade, as redes de fluxo turbulento exigem novos conceitos para as equipotenciais e as linhas de fluxo. No caso das linhas de fluxo, elas não são únicas e devem ser interpretadas como uma média na representação do trajeto do fluxo em escoamentos bidimensionais. A Figura 14 ilustra uma rede de fluxo turbulento para dois quadrados adjacentes, posicionados no mesmo canal de escoamento (ASSIS, 2003).



Fonte: Assis (2003)

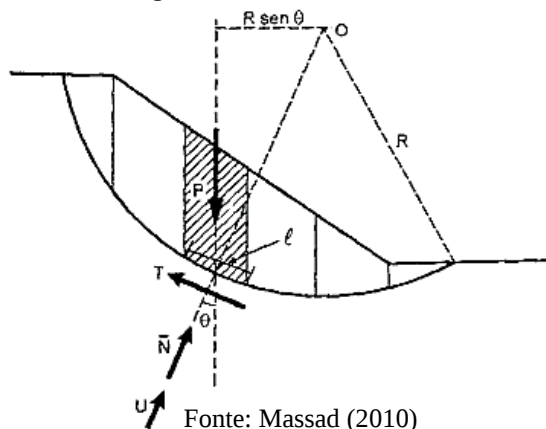
Como no fluxo laminar, no regime turbulento, entre duas equipotenciais sucessivas existe a mesma perda de carga (ASSIS, 2003).

3.7 MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

As análises de estabilidade de taludes e encostas são realizadas com base no método do equilíbrio limite. Esse método é uma abordagem amplamente utilizada na engenharia

geotécnica e faz parte da teoria da plasticidade, que trata do comportamento dos materiais quando submetidos a tensões que excedem seu limite elástico, resultando em deformações permanentes conforme a Figura 15 (SOARES, 2015).

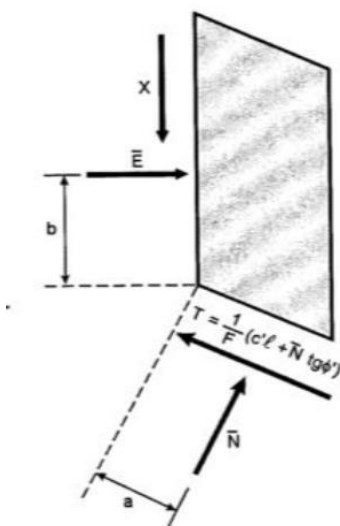
Figura 15 – Método das lamelas



O método avalia a estabilidade de um corpo, como um talude ou encosta, ao considerar o equilíbrio das forças que atuam sobre ele. A ideia central é que, para um talude se manter estável, as forças resistentes ao deslizamento devem ser superior ou, no mínimo, iguais às forças que provocam o movimento, como a gravidade e as tensões atuantes (SOARES, 2015).

A Figura 16 exibe uma lamela genérica, mostrando os parâmetros ainda não determinados. O equilíbrio de forças considera o peso (P) da lamela, as forças geradas pelas pressões neutras na base (U) e nas faces laterais, além das forças designadas como E e X , que atuam na face direita da lamela (SOARES, 2015).

Figura 16 – Forças na lamela genérica



Fonte: Massad (2010)

O coeficiente de segurança para os métodos de Fellenius e Bishop pode ser calculado utilizando a Equação 2:

$$FS = \frac{\sum(c'.l + N.tg\Phi')}{\sum(P.\text{sen}\theta)} \quad (2)$$

Onde:

c' = coesão efetiva;

N = força normal efetiva da lamela

l = largura da lamela, paralela à base;

Φ' = ângulo de resistência ao corte;

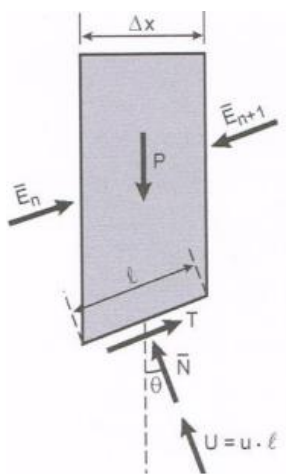
P = peso próprio da lamela;

θ = ângulo do centro imaginário do arco até o centro da base da lamela.

3.7.1 MÉTODO FELLENIUS

Se fundamenta na análise estática do volume de material localizado sobre a superfície de deslizamento, onde esse volume é subdividido em seções verticais. No método de Fellenius, esse objetivo é alcançado ao estabelecer o equilíbrio das forças na direção perpendicular à base da lamela baseia-se no equilíbrio das forças na direção normal da fatia em análise ilustrado na Figura 17. Assim calcula-se o valor de N , permitindo a utilização da Equação 3. (MASSAD, 2010).

Figura 17 – Lamela de Fellenius



$$\bar{N} = P.\cos\theta - \mu.\Delta x.\sec\theta \quad (3)$$

Onde:

P = peso próprio da lamela;

θ = ângulo do centro imaginário do arco até o centro da base da lamela;

μ = pressão neutra;

Δx = largura da lamela, paralela ao topo.

Fonte: Massad (2010).

Com base nessa compreensão, segundo Massad (2010) a Equação 4 do coeficiente de segurança é:

$$FS = \frac{\sum[c'.l + (P.\cos \theta - \mu.\Delta x.\sec \theta).tg \Phi']}{\sum(P.\sen \theta)} \quad (4)$$

Onde:

c' = coesão efetiva;

l = largura da lamela, paralela à base;

Φ' = ângulo de resistência ao corte;

P = peso próprio da lamela;

θ = ângulo do centro imaginário do arco até o centro da base da lamela;

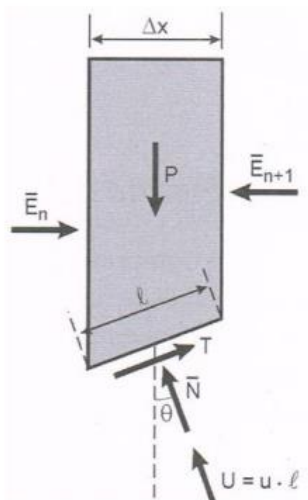
μ = pressão neutra;

Δx = largura da lamela, paralela ao topo.

3.7.2 MÉTODO DE BISHOP

Segundo Massad (2010), o método de *Fellenius* permanece amplamente utilizado por sua simplicidade, e resultados mais conservador em comparação ao método de *Bishop* e outros métodos mais precisos. A principal diferença entre o método de *Bishop* e o de *Fellenius* é que as forças que agem sobre a superfície vertical das lamelas são horizontais, como ilustrado na Figura 18 e a Equação 5 (MASSAD, 2010).

Figura 18 – Lamela de Bishop



$$\bar{N} = \frac{P - \mu.\Delta x - c'.\Delta x.tg \theta / F}{\cos \theta + tg \Phi'.\sen \theta / F} \quad (5)$$

Onde:

Φ' = ângulo de resistência ao corte;

P = peso próprio da lamela;

θ = ângulo do centro imaginário do arco até o centro da base da lamela;

μ = pressão neutra;

Δx = largura da lamela, paralela ao topo.

Fonte: Massad (2010)

Para Massad (2010) a Equação 6 é o cálculo de fator de segurança através do método de Bishop é:

$$FS = \frac{\sum \left[c' \cdot l + \frac{P - \mu \cdot \Delta x - c' \cdot \Delta x \cdot \tan \theta / F}{\cos \theta + \tan \Phi' \cdot \sin \theta / F} \cdot \tan \Phi' \right]}{\sum (P \cdot \sin \theta)} \quad (6)$$

Onde:

c' = coesão efetiva;

l = largura da lamela, paralela à base;

Φ' = ângulo de resistência ao corte;

P = peso próprio da lamela;

θ = ângulo do centro imaginário do arco até o centro da base da lamela;

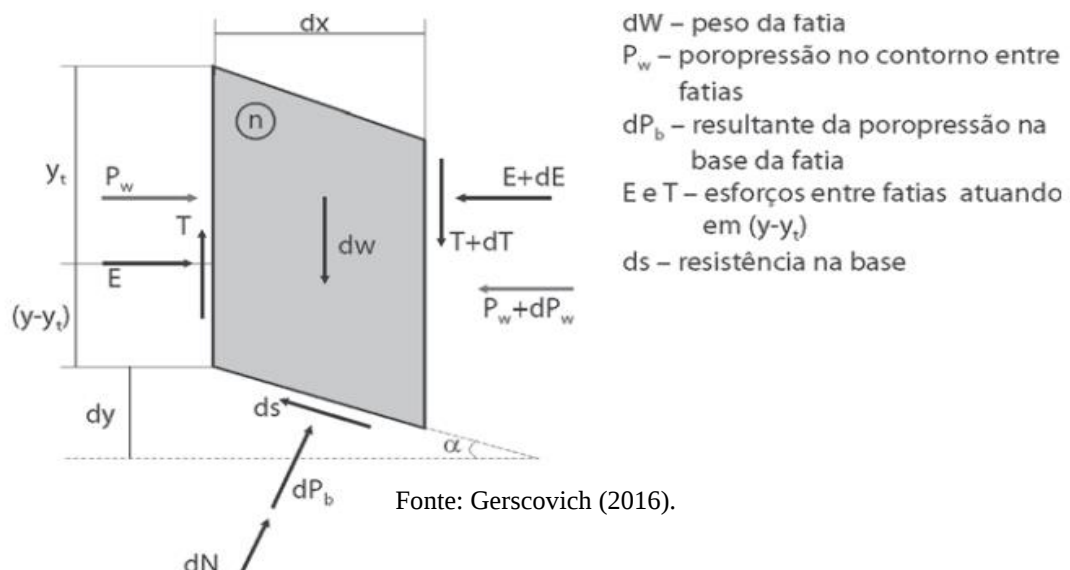
μ = pressão neutra;

Δx = largura da lamela, paralela ao topo.

3.7.3 MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

O método desenvolvido por *Morgenstern-Price* é amplamente rigoroso e pode ser aplicado a qualquer tipo de superfície de ruptura. Ele considera simultaneamente o equilíbrio de forças e de momentos para avaliar a estabilidade. Nesse método, o solo instável é dividido em pequenas lamelas infinitesimais, o que geralmente exige o uso de um computador para realizar os cálculos necessários. Na Figura 19, são ilustradas as forças que atuam nessas lamelas (GERSCOVICH, 2016).

Figura 19 – Lamela de *Morgenstern-Price*



Para que o problema se torne estaticamente determinado, diferentemente de outros métodos rigorosos que utilizam uma relação constante para as forças entre as fatias, Morgenstern e Price propuseram que a inclinação da resultante varie ao longo da superfície de ruptura, seguindo a equação 7 (GERSCOVICH, 2016).

$$T = \lambda f(x)E \quad (7)$$

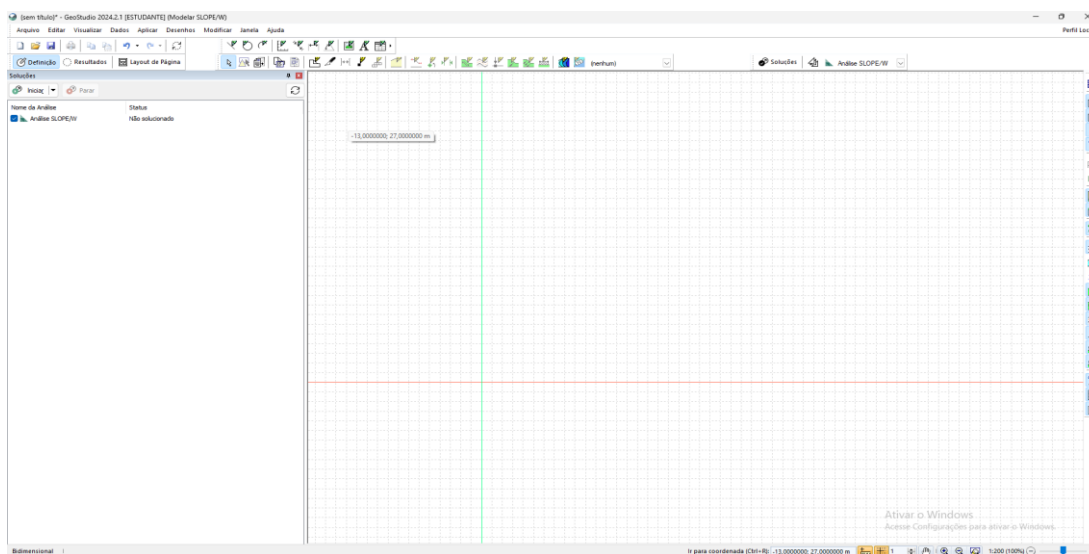
No método de Morgenstern e Price (1965), λ é uma constante obtida por um processo iterativo, enquanto $f(x)$ geralmente utiliza a função arco seno, já que essa escolha tem pouco impacto no fator de segurança. No entanto, também é possível utilizar outras funções, como constante, arco seno incompleto, trapezoidal, entre outras (GERSCOVICH, 2016).

4. METODOLOGIA

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Para a análise de instabilidade do talude, o software Geostudio será a ferramenta utilizada, a Figura 20 apresenta a interface de entrada do programa, na qual, entra-se com dados da geometria da barragem e com os parâmetros dos materiais utilizados na mesma.

Figura 20 – Interface do programa GeoStudio estudantil 2024.2.1.

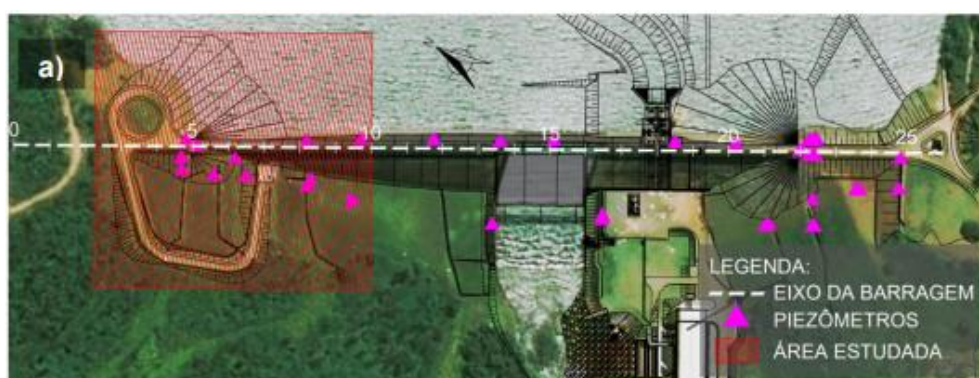


Fonte: Autor (2025)

Inicialmente foram obtidos os dados de caracterização do solo da ombreira da barragem do Ribeirão do João Leite (Figura 21), fornecidos pela orientadora e pós-doutora em geotecnia Ângela Custódia Guimarães Queiroz.

Além disso, será considerado o coeficiente de permeabilidade obtido no trabalho, cujo tema é **“Estudo sobre o Comportamento Hidrogeotécnico da Ombreira Direita da Barragem do Ribeirão João Leite”** (BARBOZA, 2021). Nessa etapa, serão definidas as propriedades geotécnicas do solo, que servirão como base para a modelagem e a análise da estabilidade do talude no software.

Figura 21 – Localização da ombreira



Fonte: Barboza (2021)

O maciço foi construído com argila siltosa, considerando-se que o material segue o comportamento descrito pela teoria da mecânica dos solos saturados, sem levar em conta os efeitos da sucção. Os parâmetros geotécnicos desse solo estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do solo

Material	Parâmetros	Valores
Argila	Peso Específico	20,3 kN/m ³
	Coesão	24 kPa
	Ângulo de Atrito	30°
	Condutividade hidráulica	6,2.10 ⁻⁸ m/s

Fonte: Autor (2025)

Para a construção do filtro da barragem, foi utilizado um solo arenoso, enquanto a fundação foi executada em rocha granítica, de acordo com a seção projetada. As propriedades geotécnicas do solo arenoso e do granito foram obtidas a partir de referências bibliográficas, garantindo a escolha adequada dos materiais para atender aos requisitos de estabilidade e

segurança da estrutura. O peso específico do filtro está apresentado na Tabela 5, considerando que o solo arenoso é medianamente compactado e saturado, assim com peso específico (γ) de 20 kN/m³.

Tabela 5– Peso específico de solos arenosos

N (golpes)	Consistência	Peso específico (KN/m ³)		
		Areia seca	Úmida	Saturada
< 5 5 - 8	Fofa Pouco compacta	16	18	19
9 – 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 - 40 > 40	Compacta Muito compacta	18	20	21

Fonte – Godoy (1998)

A partir da equação 8, foi calculado o ângulo de atrito do filtro da barragem. A estimativa do ângulo de atrito (ϕ) foi obtida por meio de uma correlação empírica com o índice de resistência à penetração (N) igual a 18 golpes do ensaio SPT (GODOY, 1998).

$$\phi = 28^\circ + 0,4.N \quad (8)$$

Para a obtenção da coesão (c') do filtro, observou-se que, em uma areia pura, a coesão é considerada igual a zero. Isso ocorre devido à ausência de partículas finas que poderiam gerar forças de atração entre elas, resultando em um material com comportamento não coesivo. Assim temos os parâmetros do filtro descrito na tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros do filtro

Material	Parâmetros	Valores
Areia	Peso Específico	20 kN/m ³
	Coesão	0
	Ângulo de Atrito	35°
	Condutividade hidráulica	1.10 ⁻⁴ m/s

Fonte: Autor (2025)

Para o granito da fundação, o peso específico (γ) considerado igual a 27 kN/m³ com base na tabela 7, o ângulo de atrito e coesão considerou com base na resistência típica ao cisalhamento do granito de acordo com a tabela 8.

Tabela 7- Peso específico relativo a materiais rochosos

b) Rochas e Materiais Rochosos e Fragmentados	Peso Específico Aparente
	Kg/m ³
Ardósia	2.600 a 2.700
Areia Quartzosa Seca	1.700
Areia Quartzosa Úmida	1.800 a 2.000
Arenito	2.100 a 2.300
Basalto	2.900
Brita Basáltica	1.700
Brita Calcárea ou Arenária	1.600
Brita Granítica	1.800
Calcáreo Compacto	1.800 a 2.600
Calcáreo Leve	1.600
Cascalho de Rocha-Seco	1.500
Cascalho de Rocha-Úmido	1.800 a 2.000
Gnaiss	2.600
Granito	2.600 a 3.000
Mármore	2.500 a 2.800
Pedra Sabão	2.700
Rocha Marroada	1.600 a 1.700
Seixo Arenoso	1.600
Seixo de Pedra Pomes	1.600

Fonte: Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro (2007)

Tabela 8- Resistência típica ao cisalhamento da rocha intacta

Origem	Tipo de Rocha	Resistência ao Cisalhamento	
		Coesão (Mpa)	Ângulo de Atrito
Sedimentar-menos rígida	Arenito(triássico), carvão, giz, xisto, calcário (triássico)	1-20	25-35
Sedimentar-rígida	Calcário, calcário dolomítico, grauvaque, arenito (carbonífero), calcário	10-30	35-45
Metamórficas- não foliada	Quartzito, mármore, gneis	20-40	30-40
Metamórficas- não foliada	Xisto, ardósia, filito	10-30	25-35
Igneas- ácido	Granito	30-50	45-55
Igneas- básico	Basalto	30-50	30-40

Fonte: Look, 2014

Na Tabela 9, estão apresentados os parâmetros necessários para a análise da fundação, incluindo as características geotécnicas, que são essenciais para a avaliação da estabilidade.

Tabela 9 – Parâmetros da fundação

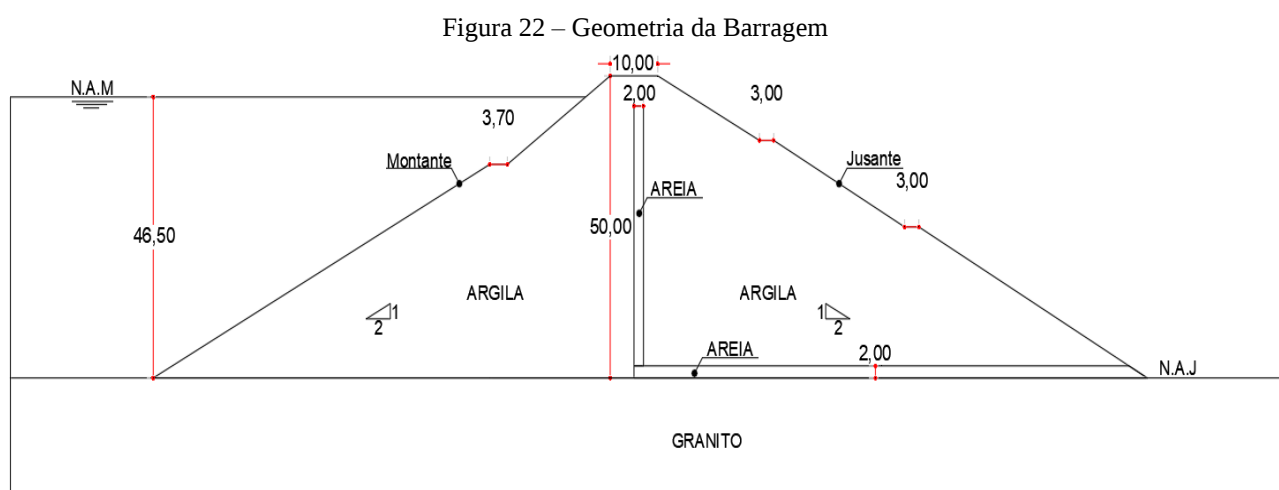
Material	Parâmetros	Valores
Granito	Peso Específico	27 kN/m ³
	Coesão	40 kPa
	Ângulo de Atrito	45°
	Condutividade hidráulica	1.10 ⁻¹⁰ m/s

Fonte: Autor (2025)

Os parâmetros de permeabilidade apresentados na tabela 6 e 8 foram extraídos do estudo de Cruz (1996).

4.2 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA BARREGEM

A barragem foi projetada com uma altura de 50 m, e a inclinação dos taludes foi definida com base em referências bibliográficas. De acordo com Cruz (1996), para barragens de terra com maciço de solo argiloso compactado, a inclinação do talude de montante pode variar entre 2,0(H):1,0(V) e 3,0(H):1,0(V), enquanto o talude de jusante apresenta variação entre 2,0(H):1,0(V) e 2,5(H):1,0(V). Neste estudo, optou-se por uma de 2,0(H):1,0(V) para ambos os taludes, ilustrado na Figura 22.



Fonte: Autor (2025)

Para o controle da percolação, foi implementado um sistema de desvio interno no maciço da barragem, composto por filtros vertical e horizontal. De acordo com Cruz (1996), a espessura mínima recomendada para o filtro vertical é de 0,80 m, devido às limitações dos equipamentos e ao método construtivo, enquanto a espessura máxima para o filtro horizontal é de 2 m, visando à economia de materiais. Neste estudo, optou-se pela espessura de 2,00 m em ambos os filtros (CRUZ,1996).

4.3 ETAPAS DE ANÁLISES

Serão selecionados os módulos Slope/w e Seep/w, que operam de forma integrada, permitindo uma análise conjunta do fluxo de água e da estabilidade da encosta. Esse processo

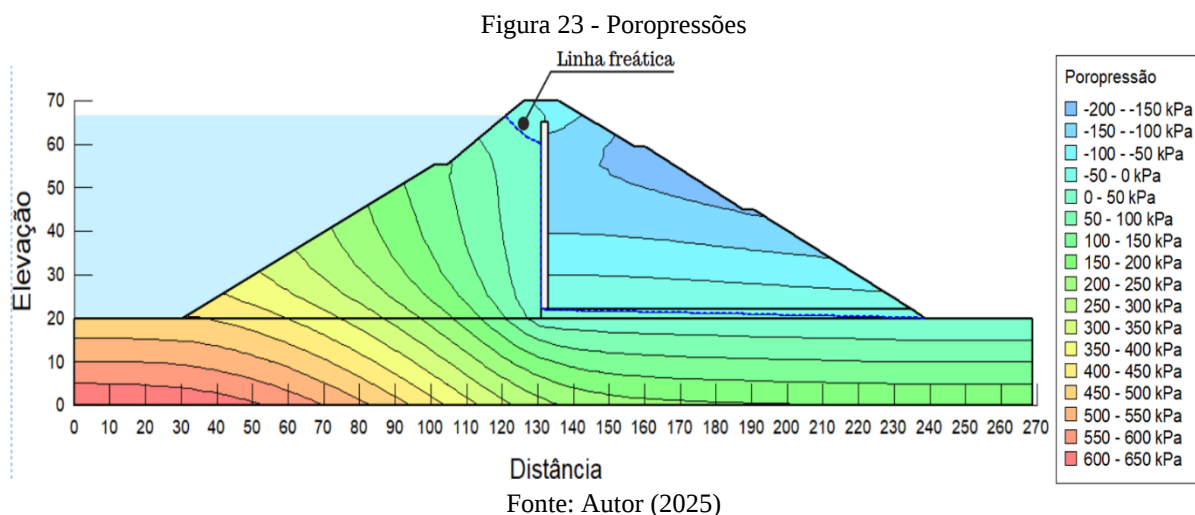
possibilitará a avaliação final da construção sem a consideração de cargas hidráulicas, enquanto o regime de operação será analisado importando a rede de fluxo gerada pelo módulo Seep/w.

5. ANÁLISE E RESULTADOS

Espera-se que os resultados do fator de segurança estejam de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 11682, que define os critérios de segurança em barragens. Avaliados pelos métodos de cálculo *Fellenius*, *Bishop* e *Morgenstern – Price*, permitindo uma avaliação e comparação com a norma.

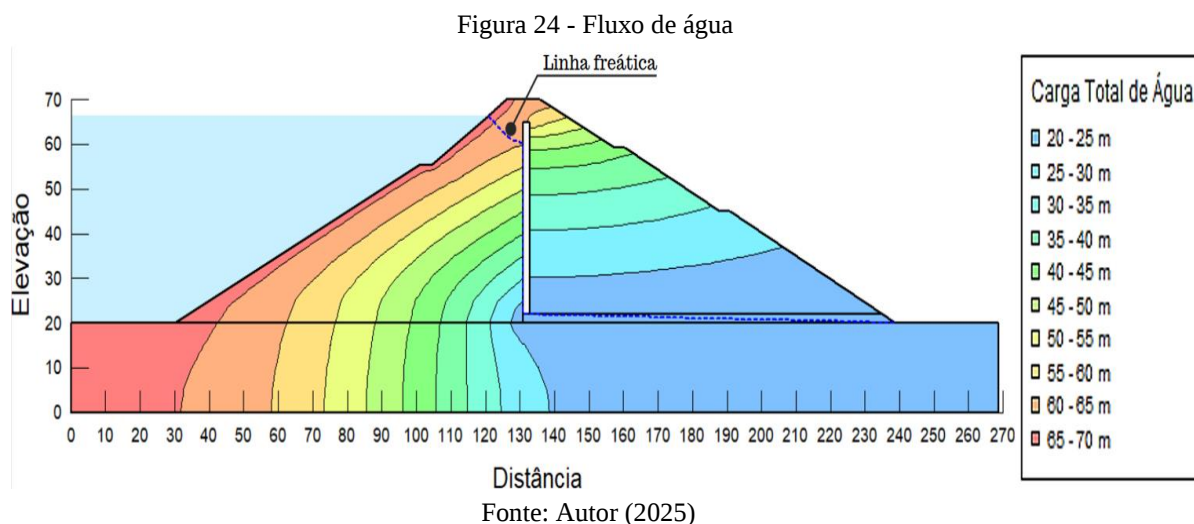
5.1 ANÁLISE DA REDE DE FLUXO UTILIZANDO O SOFTWARE GEOSTUDIO (SEEP/W)

A Figura 23 exibe a linha freática juntamente com as distribuições de poropressão, fornecendo uma representação detalhada das condições hidrogeológicas da estrutura analisada. Essa visualização possibilita a compreensão do comportamento do fluxo de água, das zonas de saturação e das variações de pressão nos poros do solo, contribuindo para a avaliação da estabilidade e do desempenho geotécnico da estrutura.



A vazão máxima no sistema de drenagem, que é de $1,5413 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, indicando a capacidade máxima de escoamento do sistema sob as condições avaliadas. Essa vazão é um parâmetro crucial para dimensionamento e avaliação da eficiência do sistema de drenagem, garantindo que ele consiga conduzir o fluxo de água.

A Figura 24 apresenta as diferentes cargas totais de água atuando na barragem, destacando a distribuição do gradiente hidráulico ao longo da estrutura. As perdas de carga são representadas pelas linhas equipotenciais, evidenciando uma queda uniforme de 5 em 5 metros. Essa visualização facilita a compreensão do comportamento do fluxo de água através do solo, permitindo avaliar a eficiência do sistema de drenagem e a estabilidade da barragem sob diferentes condições operacionais.



Com as linhas freáticas definidas e a porção saturada das seções hipotéticas estabelecida, foram realizadas as análises de estabilidade dos taludes, considerando diferentes cenários de carga e condições operacionais.

5.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM UTILIZANDO O SOFTWARE GEOSTUDIO (SLOPE/W)

5.2.1 FINAL DA CONSTRUÇÃO

A primeira etapa da análise não considera a rede de fluxo. Serão apresentadas as superfícies de ruptura nas faces montante e jusante, juntamente com os respectivos fatores de segurança mínimos pelos métodos de *Bishop*, *Fellenius* e *Morgenstern-Price*. Essa abordagem inicial permite avaliar a estabilidade do talude em condições simplificadas, fornecendo uma base para comparações posteriores com análises mais detalhadas que consideram o comportamento do fluxo de água na estrutura.

As Figuras 25 a 30 mostram os fatores de segurança (FS) para os taludes de montante e jusante, conforme detalhado na Tabela 10. Os valores obtidos são superiores aos exigidos pela

norma NBR 11682, indicando que, nesta configuração geométrica, a estabilidade da barragem não apresenta risco crítico.

Tabela 10 - Fator de Segurança obtidos no final da construção

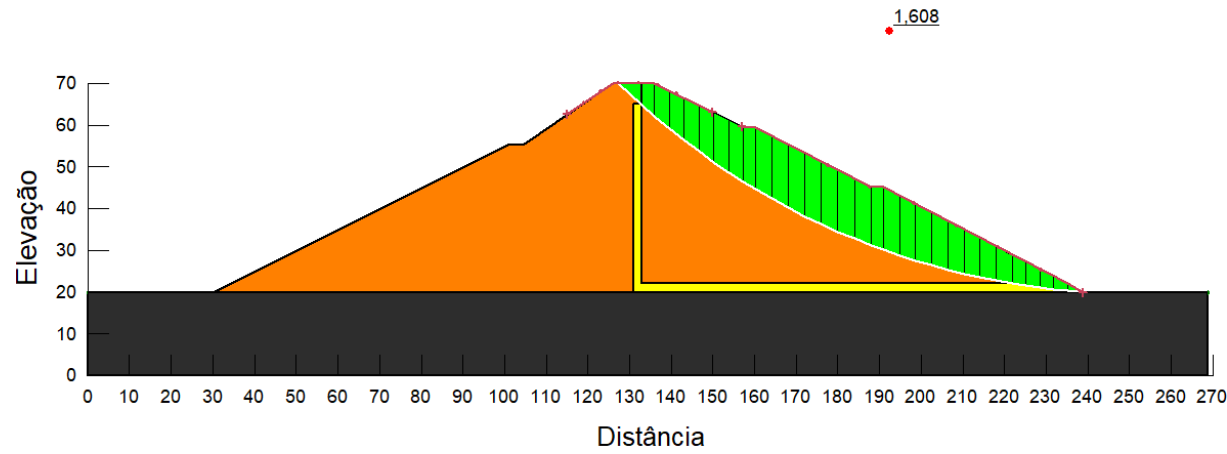
Método	FS Montante	FS Jusante
Bishop	1,586	1,608
Fellenius	1,571	1,530
Morgenstern-Price	1,584	1,608

Fonte: Autor (2025)

a) Final de Construção a jusante pelo método de Bishop

O valor 1,608 apresentado na figura 25 representa o fator de segurança (FS) crítico correspondente à superfície de ruptura analisado pelo método de Bishop a jusante da barragem. Esse fator de segurança indica a relação entre as forças resistentes e as forças atuantes na superfície.

Figura 25 - Fator de Segurança no Final de Construção a Jusante pelo método de Bishop

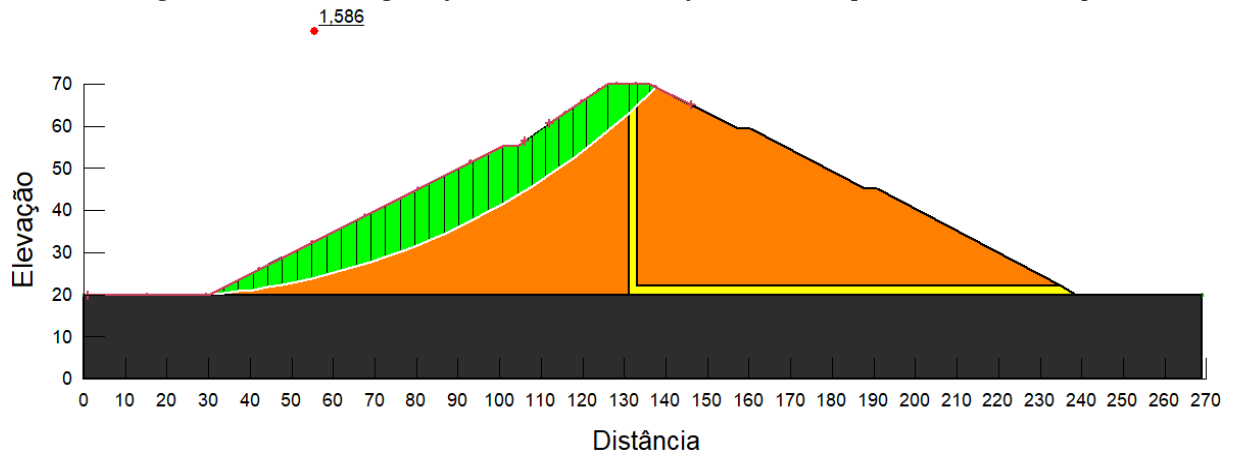


Fonte: Autor (2025)

b) Final de Construção a montante pelo método de Bishop

O valor 1,586 apresentado na figura 26 representa o fator de segurança crítico correspondente à superfície de ruptura analisado pelo método de Bishop a montante da barragem.

Figura 26 - Fator de Segurança no Final de Construção a montante pelo método de *Bishop*

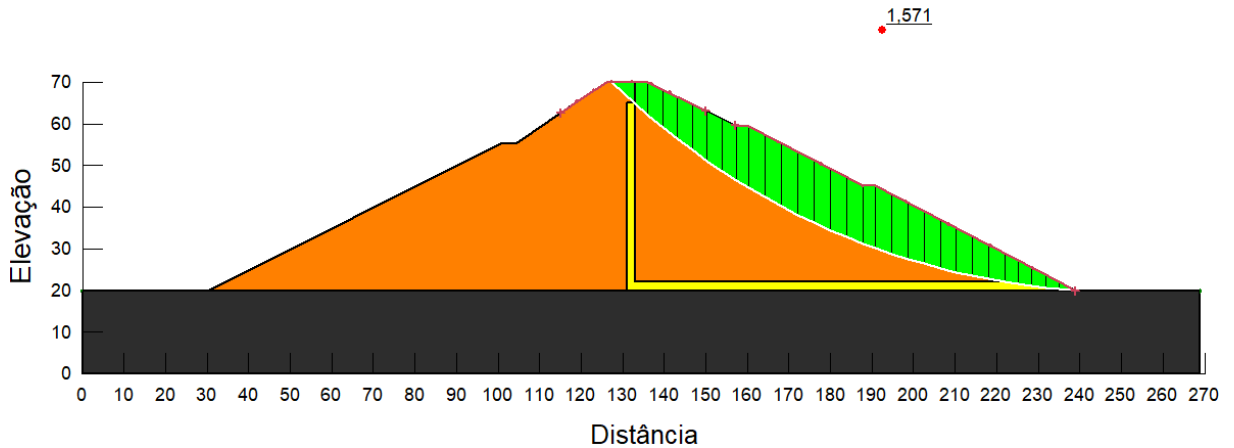


Fonte: Autor (2025)

c) Final de Construção a jusante pelo método de *Fellenius*

O valor 1.571 exibido na Figura 27 representa o fator de segurança crítico referente à superfície de ruptura comprovada pelo método de Fellenius na região a jusante da barragem.

Figura 27 - Fator de Segurança no Final de Construção a jusante pelo método de *Fellenius*

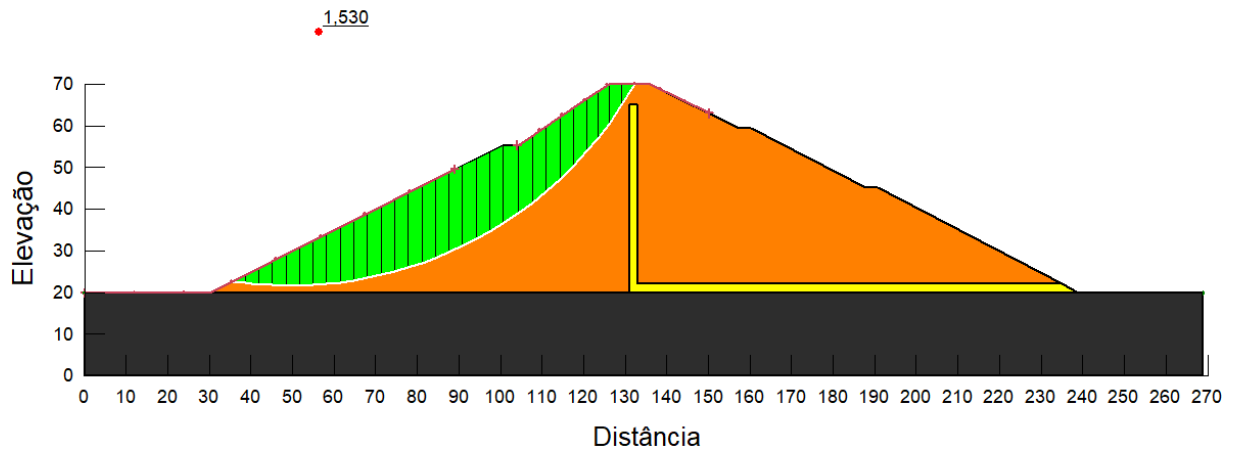


Fonte: Autor (2025)

d) Final de Construção a montante pelo método de *Fellenius*

O valor 1.530 exibido na Figura 28 representa o fator de segurança crítico referente à superfície de ruptura comprovada pelo método de Fellenius na região montante da barragem.

Figura 28 - Fator de Segurança no Final de Construção a montante pelo método de *Fellenius*

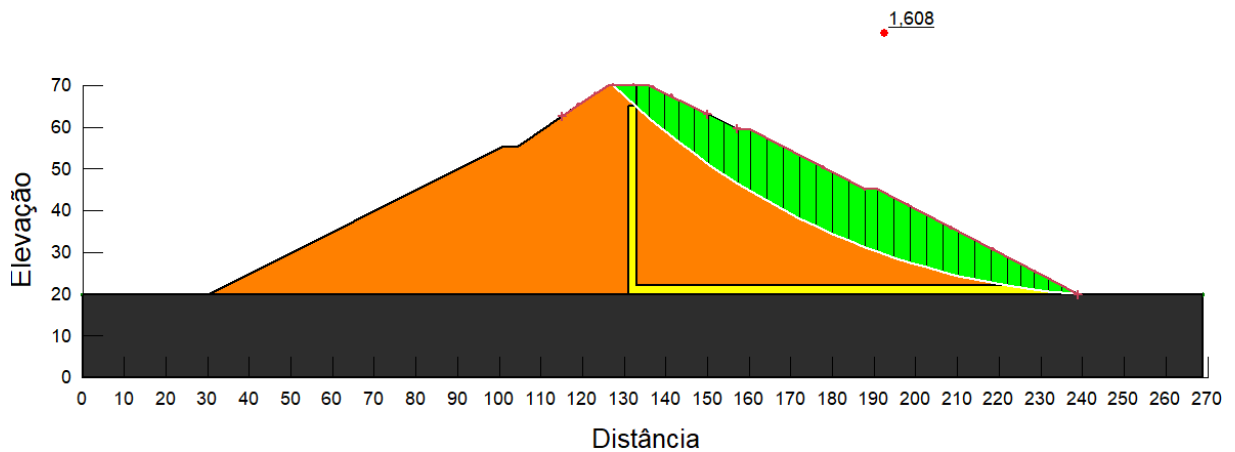


Fonte: Autor (2025)

e) Final de Construção a jusante método de *Morgenstern-Price*

O valor 1,608 apresentado na figura 29 representa o fator de segurança (FS) crítico correspondente à superfície de ruptura analisado pelo método de *Morgenstern-Price* a jusante da barragem.

Figura 29 - Fator de Segurança no Final de Construção a Jusante pelo método de *Morgenstern-Price*

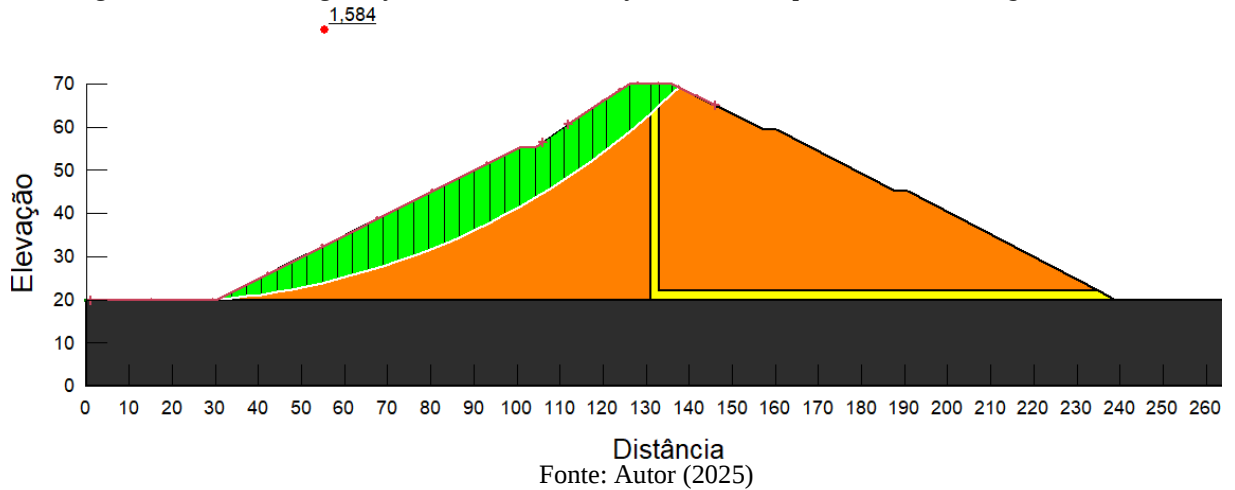


Fonte: Autor (2025)

f) Final de Construção a montante método de *Morgenstern-Price*

O valor 1,584 apresentado na figura 30 representa o fator de segurança (FS) crítico correspondente à superfície de ruptura analisado pelo método de *Morgenstern-Price* a montante da barragem.

Figura 30 - Fator de Segurança no Final de Construção a Montante pelo método de *Morgentern-Price*



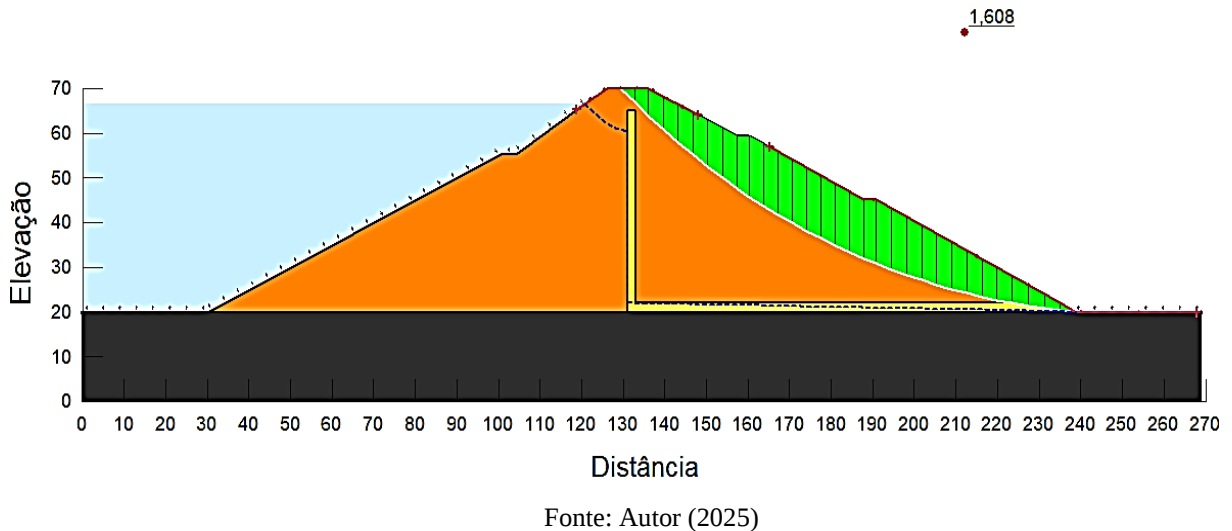
5.2.2 REGIME PERMANENTE DE OPERAÇÃO

Nesta etapa, a rede de fluxo gerada no *SEEP/W* será importada para o *SLOPE/W*, uma vez que já há uma rede de fluxo definida para essa fase. A análise será realizada exclusivamente no talude de jusante, considerando que a presença de água atua como um fator estabilizador no talude de montante, então os fatores de segurança vão ser sempre superiores aos de jusante.

a) Regime de Operação a Jusante Pelo Método de *Bishop*

O fator de segurança crítico na etapa de operação é de 1,608, conforme ilustrado na Figura 31, sendo esse valor superior ao mínimo recomendado pela NBR 11682.

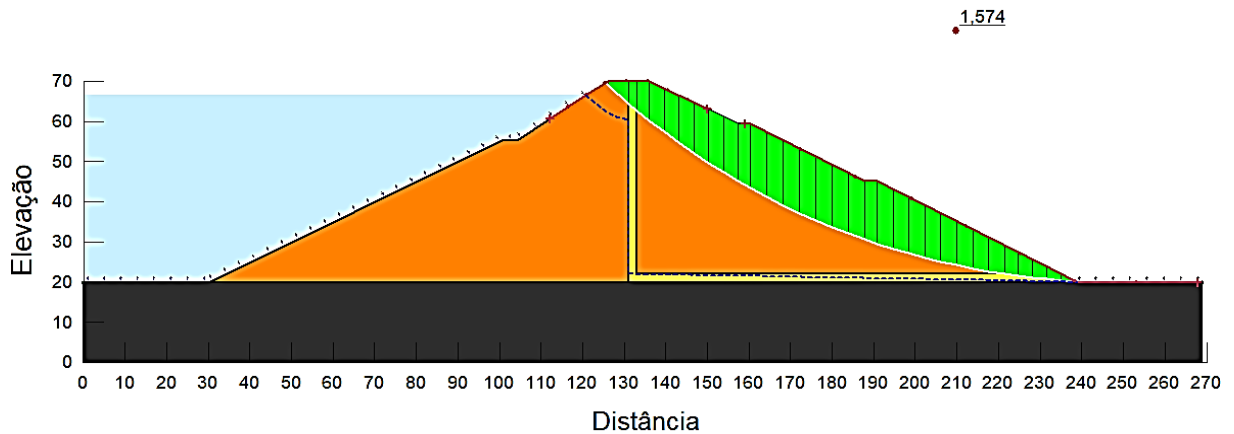
Figura 31 - Fator de Segurança no Regime de Operação a Jusante pelo método de *Bishop*



b) Regime de Operação a Jusante Pelo Método de *Fellenius*

O fator de segurança crítico na etapa de operação é de 1.574, conforme ilustrado na Figura 32, sendo esse valor superior ao mínimo recomendado pela NBR 11682. Esse resultado indica que a estrutura apresenta estabilidade adequada durante a operação.

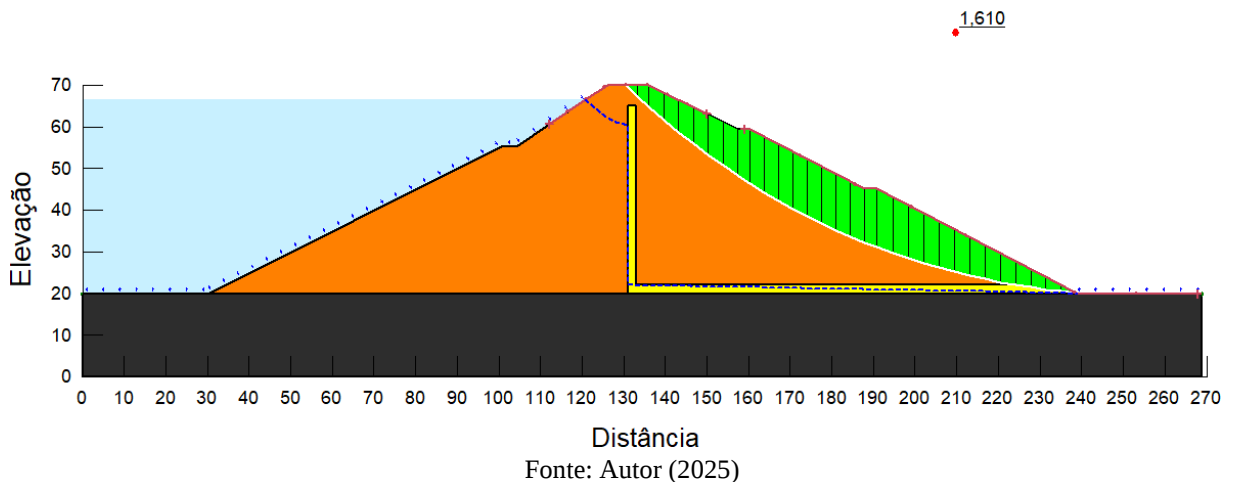
Figura 32 - Fator de Segurança no Regime de Operação a Jusante pelo método de *Fellenius*



c) Regime de Operação a Jusante Pelo Método de *Morgenstern-Price*

O fator de segurança crítico na etapa de operação é de 1.610, conforme ilustrado na Figura 33, sendo esse valor superior ao mínimo recomendado pela NBR 11682. Esse resultado demonstra que a barragem possui uma margem de segurança adequada frente às condições operacionais.

Figura 33 - Fator de Segurança no Regime de Operação a Jusante pelo método de *Morgenstern-Price*



As Figuras 31 a 33 mostram os fatores de segurança (FS) para os taludes de jusante, conforme detalhado na Tabela 11. Os valores obtidos são superiores aos exigidos pela norma NBR 11682, indicando que, a estabilidade da barragem não apresenta risco.

Tabela 11 - Fator de Segurança obtidos no regime de operação

Método	FS Jusante
Bishop	1,608
Fellenius	1,574
Morgenstern-Price	1,610

Fonte: Autor (2025)

A análise do fator de segurança do rebaixamento rápido da barragem não foi realizada devido a uma restrição imposta pela licença estudantil do software *GeoStudio*. Essa limitação impediu a realização dos cálculos e da avaliação detalhada dos potenciais riscos associados a esse tipo de operação. O fator de segurança é fundamental para garantir a estabilidade da estrutura durante um rebaixamento, pois ele avalia a margem de segurança da barragem frente a condições de estresse, como mudanças rápidas nos níveis de água.

De acordo com a NBR 11682, o fator de segurança mínimo recomendado é 1,50. Todos os métodos analisados atendem a esse critério, indicando estabilidade satisfatória. No entanto, o método de Fellenius, apesar de também estar dentro do limite aceitável, apresenta o menor FS e, portanto, seria o mais conservador na análise de estabilidade. Já os métodos de Bishop e Morgenstern-Price, além de estarem de acordo com a norma, fornecem uma maior margem de segurança, especialmente a jusante.

6. CONCLUSÃO

Com base nos fatores de segurança (FS) apresentados na Tabela 10, observa-se que os métodos de Bishop e Morgenstern-Price forneceram resultados muito próximos, tanto para o montante quanto para a jusante, com FS de aproximadamente 1,59 e 1,61, respectivamente. O método de Fellenius, por outro lado, apresentou os menores fatores de segurança, especialmente a jusante, onde o FS foi de 1,53. Da mesma forma, na Tabela 11, é possível aplicar a mesma conclusão aos fatores de segurança (FS) a jusante da barragem, onde os métodos de Bishop e Morgenstern-Price novamente mostraram valores muito próximos, enquanto o método de Fellenius apresentou os menores fatores de segurança. Portanto, a escolha do método a ser utilizado pode depender do grau de conservadorismo desejado no projeto, sendo o método de

Fellenius mais indicado para análises preliminares e os outros dois métodos para um nível de detalhamento maior e maior segurança estrutural.

7. REFERÊNCIAS

ICOLD. **Definição de grande barragem**. Comissão internacional sobre grandes barragens, 2011. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/GB/dams/definition_of_a_large_dam.asp. Acesso em: 27/09/2024.

ICOLD. **Papel das barragens**. Comissão internacional sobre grandes barragens, 2024. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/GB/dams/dams.asp>. Acesso em: 27/09/2024.

ICOLD. **Número de barragens por país**, 2024. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/number-of-dams-by-country. Acesso em: 27/09/2024

CBDB. **A História das Barragens no Brasil Séculos XIX, XX e XXI**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2006.

ASSIS, André. **Apostila de barragens**. Brasília: Universidade de Brasília departamento de engenharia civil e ambiental, 2003.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

CARVALHO, David. **Barragens: Uma introdução para graduandos**. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2011.

JÓNATAS, Ricardo Jorge Lourenço. **Rotura de barragens de aterro por galgamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Lisboa: Universidade de Lisboa, 2013

POWLEDGE, George R., D. C. Ralston, P. Miller, Y. H. Chen, P. E. Clopper, e D.M. Temple. "Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. II." *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988.

Filho, Jorge Felipe da Silva, e Evandro Moraes da Gama. "Um modelo para análise do fluxo através das fundações de barragens de betão." *Revista Escolar de Minas*, 2003.

SOARES, José Paulo Rocha. **Segurança contra o risco de pipping em barragens de terra através da distribuição weibull**. Essentia, revista e cultura, ciência e tecnologia, 2020.

MASSAD, Façal. **Barragens: Obras de terra: Curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

SILVIO, Braz de Sousa. **Impactos da implantação da barragem no Ribeirão João Leite sobre a oferta de hortifruti na grande Goiânia**. Universidade Federal de Goiás, 2013.

RIOS, Kelly Cristine R. Constantino. **Caracterização Exploratória – espacial da bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite/Goiás**. Escola de engenharia civil Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2013.

ANDREETTA, Arthur Bucciarelli. **Segurança de barragens a partir da análise de estabilidade e permeabilidade de taludes pelo software GeoStudio**. Faculdade Unyleya Engenharia Geotécnica, 2019.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo, Oficina de Textos, 1996.

BARBOZA, D. U. **Estudo sobre o Comportamento Hidrogeotécnico da Ombreira Direita da Barragem do Ribeirão João Leite**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

TEIXEIRA, A. T.; GODOY, N. S. **Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. Fundação: Teoria e Prática**. São Paulo, SP, PINI, 1998.

LOOK, Burt G. 2014. **Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables**, 2 ed. p. 119.

SOUZA, Mariana Miranda. **Estudo Para O Projeto Geotécnico Da Barragem De Alto Irani, Sc**. Dissertação de graduação ao curso de engenharia civil, Escola de Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2013.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

KALUME, Cecília L. de Carvalho. **Análise de Estabilidade dos Taludes de uma Barragem Homogênea Utilizando os Softwares Geostudio e Geo5**. Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB– Centro Universitário de Brasília, BSB, 2017.

PREFEITURA, Rio de Janeiro. **PCRJ SCO-Sistema de Custos de Obras e Serviços de Engenharia FGV**. 2007. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/9463671/4234647/TABELASDFGV02.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2025.