



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



ANA BEATRIZ GUERRA DRUMOND LAGE

AVALIAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA DO TALUDE DE MONTANTE DE UMA  
BARRAGEM DE ÁGUA MEDIANTE O REBAIXAMENTO RÁPIDO DO NÍVEL DO  
RESERVATÓRIO

OURO PRETO  
Agosto 2025

Avaliação dos fatores de segurança do talude de montante de uma barragem de água mediante o rebaixamento rápido do nível do reservatório

Ana Beatriz Guerra Drumond Lage

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheira Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 29/08/2025

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch

OURO PRETO

Agosto 2025

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L174a Lage, Ana Beatriz Guerra Drumond.

Avaliação dos fatores de segurança do talude de montante de uma barragem de água mediante o rebaixamento rápido do nível do reservatório. [manuscrito] / Ana Beatriz Guerra Drumond Lage. - 2025. 70 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Barragens e açudes. 2. Barragens e açudes - Segurança. 3. Estabilidade estrutural. 4. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade - Talude de Montante. I. Loch, Felipe de Campos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Ana Beatriz Guerra Drumond Lage**

**Avaliação dos fatores de segurança do talude de montante de uma barragem de água mediante o rebaixamento rápido do nível do reservatório.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheira civil.

Aprovada em 29 de agosto de 2025

### Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Mateus Oliveira Xavier - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Eng. Luiz Antônio Rangel Ianelli - (Samarco Mineração)

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch**, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 02/09/2025, às 11:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0971361** e o código CRC **4A57DBE9**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional, incentivo e compreensão em todos os momentos, sendo minha base e motivação para seguir em frente. Ao meu irmão Henrique, por ser inspiração. Às famílias Guerra e Drumond, pela torcida e carinho ao longo desta trajetória.

A todos os professores que tive ao longo da graduação, agradeço pelos conhecimentos compartilhados, que contribuíram de forma significativa para a minha formação. Em especial, agradeço ao professor Felipe Loch por toda a disponibilidade, paciência e dedicação.

À Samarco, em especial à Gerência de Geotecnia, pela oportunidade de crescimento profissional e por todo aprendizado. Ao Luiz Ianelli, pelo suporte constante durante o desenvolvimento deste trabalho e por cada ensinamento.

Aos meus amigos, que compartilharam experiências, dificuldades e conquistas durante esta jornada acadêmica, tornando-a mais leve.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma maneira, participaram desta etapa da minha vida. O apoio de vocês foi essencial para que este trabalho se concretizasse.

## RESUMO

As barragens desempenham papel essencial no desenvolvimento econômico e social, sendo utilizadas para fins como abastecimento de água, geração de energia, irrigação, disposição de rejeitos e controle de cheias. Entretanto, essas estruturas estão sujeitas a riscos de instabilidade, o que torna imprescindível a análise de cenários críticos capazes de comprometer sua segurança. Entre eles, destaca-se o rebaixamento rápido do nível do reservatório, condição crítica para o talude de montante, pois a lâmina d'água é reduzida abruptamente, sem tempo suficiente para a dissipação das poropressões no interior do maciço. Neste trabalho, apresenta-se um estudo de caso em uma barragem de água localizada no Quadrilátero Ferrífero, com simulações numéricas em dois cenários distintos de rebaixamento. O primeiro considerou uma redução gradual do nível do reservatório, acompanhando a evolução dos fatores de segurança a longo prazo. Em seguida, foi analisado um segundo cenário, no qual se simulou o rebaixamento total em apenas um dia, com o intuito de representar uma situação emergencial e avaliar os impactos imediatos sobre a estabilidade da estrutura. Ademais, identificou-se a taxa máxima admissível de rebaixamento rápido, de modo que o fator de segurança permanecesse em conformidade com o limite mínimo exigido pela norma. Para isso, foram utilizados dados geotécnicos reais e realizada a modelagem numérica por meio do software Slide2, com simulações em regime permanente e transiente de fluxo. Os resultados demonstraram que a taxa de rebaixamento do reservatório exerce influência direta sobre a estabilidade da estrutura. Conclui-se, portanto, que, em situações operacionais ou emergenciais, a adoção de taxas de rebaixamento controladas é fundamental para garantir a integridade estrutural da barragem.

**Palavras-chaves:** Rebaixamento Rápido; Barragem; Fator de Segurança; Estabilidade; Talude de Montante.

## ABSTRACT

Dams are fundamental infrastructures for economic and social development, serving multiple purposes such as water supply, power generation, irrigation, disposal of tailings and flood control. Despite their importance, these structures are subject to instability risks, which makes the analysis of critical scenarios that may compromise their safety indispensable. Among these, rapid drawdown of the reservoir level stands out, as it poses a significant threat to the upstream slope, given that the water level is abruptly reduced without sufficient time for the dissipation of porepressures within the embankment. This study presents a case analysis of a water dam located in the Cuadrilátero Ferrífero region, with numerical simulations for two distinct drawdown scenarios. The first scenario evaluated the gradual reduction of the reservoir level and followed the evolution of the safety factors over time. The second scenario simulated a complete drawdown in a single day, representing an emergency situation, allowing the assessment of the immediate impacts on the dam's structure's stability. Furthermore, the maximum allowable rate of rapid drawdown was identified, so that the safety factor remained in compliance with the minimum limit required by the standard. For this purpose, real geotechnical data was used alongside a numerical modeling carried out with the Slide2 software, with both steady and transient flow conditions. The results showed that the reservoir's drawdown rate has a direct influence on the structure's stability. Therefore, in both operational and emergency situations, it is essential to use controlled drawdown procedures to ensure the structural integrity of the dam.

**Keywords:** Rapid Drawdown; Dam; Safety Factor; Stability; Upstream Slope.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragens de terra. ....	16
Figura 2 – Barragens de enrocamento. ....	18
Figura 3 – Forças atuantes em uma fatia genérica.....	22
Figura 4 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Fellenius.....	23
Figura 5 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Morgenstern-Price. ....	24
Figura 6 – Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer.....	25
Figura 7 – Determinação gráfica do fator de segurança pelo método de Spencer. ....	27
Figura 8 – Forças atuantes numa fatia genérica consideradas pelo Método de Sarma. ....	28
Figura 9 – Fluxo laminar e turbulento. ....	33
Figura 10 – (a) Definição de linhas de fluxo e linhas equipotenciais; (b) rede de fluxo finalizado. ....	35
Figura 11 – Um elemento de fluxo em solo anisotrópico: (a) na seção transformada; (b) na seção real. ....	36
Figura 12 – Métodos para o controle da percolação.....	37
Figura 13 – Filtro vertical inclinado à jusante. ....	38
Figura 14 – Filtro vertical inclinado à montante. ....	38
Figura 15 – Poropressões teóricas durante rebaixamento rápido. ....	40
Figura 16 – Fluxograma da metodologia.....	44
Figura 17 – Localização do Quadrilátero Ferrífero. ....	45
Figura 18 – Seção 1-1' analisada no estudo. ....	46
Figura 19 – Instrumentação da seção 1-1' .....	48
Figura 20 – Análise do talude de montante na condição habitual da barragem. ....	53
Figura 21 – Rebaixamento no estágio 1. ....	53
Figura 22 – Rebaixamento no estágio 2. ....	54
Figura 23 – Rebaixamento no estágio 3. ....	54
Figura 24 – Rebaixamento no estágio 4. ....	54
Figura 25 – Rebaixamento no estágio 5. ....	55
Figura 26 – Rebaixamento no estágio 6. ....	55
Figura 27 – Rebaixamento no estágio 7. ....	55

Figura 28 – Rebaixamento no estágio 8. ....	56
Figura 29 – Rebaixamento no estágio 9. ....	56
Figura 30 – Rebaixamento no estágio 10. ....	56
Figura 31 – Rebaixamento no estágio 11 – após 100 dias. ....	57
Figura 32 – Rebaixamento no estágio 12 – após 200 dias. ....	57
Figura 33 – Rebaixamento no estágio 13 – após 300 dias. ....	58
Figura 34 – Gráfico do fator de segurança ao decorrer do tempo. ....	59
Figura 35 – Gráfico da variação do nível do reservatório com o fator de segurança. ....	60
Figura 36 – Rebaixamento em um dia. ....	61
Figura 37 – Rebaixamento em 3 dias. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração.....	21
Tabela 2 – Instrumentação da barragem em estudo. ....	46
Tabela 3 – Parâmetros geotécnicos de resistência.....	47
Tabela 4 – Parâmetros de permeabilidade.....	49
Tabela 5 – Dados inseridos na análise de fluxo transiente.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
DCE	Declarações de Condição de Estabilidade
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
INA	Indicador de Nível de Água
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PAE	Plano de Ação de Emergência
PESB	Política Estadual de Segurança de Barragens
PNSB	Plano Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança da Barragem
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SIGBM	Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração
Sisema	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
$c'$	Coesão do solo
$\phi'$	Ângulo de atrito
A	Área de seção transversal do solo onde a água percola
E	Força normal entre as fatias
FS	Fator de segurança
I	Gradiente hidráulico
ks	Coefficiente de permeabilidade saturado
Q	Vazão de percolação
T	Força tangencial entre as fatias
u	Poropressão
ua	Pressão do ar
uw	Pressão da água
$\Delta U$	Variação de poropressão

$\sigma$	Tensão total
$\sigma'$	Tensão efetiva
$\chi$	Parâmetro relacionado com o grau de saturação
$W_i$	Peso da n-ésima fatia
$l$	Comprimento da base da fatia
$u$	Força de percolação
$\alpha$	Inclinação da base da fatia
$\lambda$	Constante a ser determinada no processo iterativo
$\tau_{mob}$	Tensão cisalhante mobilizada
$\tau_{res}$	Tensão cisalhante resistente

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Objetivo .....	14
1.1.1. Objetivos específicos.....	14
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1. CONCEITOS GERAIS SOBRE BARRAGENS .....	15
2.1.1. Barragens de terra.....	16
2.1.2. Barragens de enrocamento.....	17
2.1.3. Barragens de rejeitos .....	18
2.2. AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE FÍSICA.....	19
2.2.1. Método de Fellenius .....	22
2.2.2. Método de Morgenstern-Price .....	24
2.2.3. Método de Spencer .....	25
2.2.4. Método de Sarma.....	27
2.3. SEGURANÇA DE BARRAGEM.....	28
2.4. ESTUDO DA PERCOLAÇÃO .....	31
2.4.1. Lei de Darcy .....	32
2.4.2. Rede de fluxo.....	34
2.4.3. Métodos de controle da percolação .....	36
2.5. REBAIXAMENTO RÁPIDO .....	38
2.5.1. Resistência durante o rebaixamento .....	41
2.5.2. Caso de ruptura durante o rebaixamento rápido.....	42
3. METODOLOGIA.....	44
3.1. GEOMETRIA DA BARRAGEM.....	44
3.2. INSTRUMENTAÇÃO .....	46

3.3.	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS.....	47
3.4.	ESTUDO DO REBAIXAMENTO DO RESERVATÓRIO.....	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	52
4.1.	AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE FÍSICA PARA REBAIXAMENTO GRADUAL .....	52
4.2.	AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE FÍSICA PARA REBAIXAMENTO EM UM DIA .....	61
4.3.	VERIFICAÇÃO DA TAXA DE REBAIXAMENTO PARA CONDIÇÃO LIMITE DE ESTABILIDADE .....	62
5.	CONCLUSÃO.....	64

## 1. INTRODUÇÃO

As barragens desempenham papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, sendo utilizadas para diversos fins, como abastecimento de água, geração de energia elétrica, controle de cheias, irrigação e disposição de rejeitos provenientes da atividade mineradora. Apesar da relevância, essas estruturas apresentam riscos associados à sua operação, especialmente no que diz respeito à estabilidade física dos taludes e ao controle da percolação, fatores fundamentais para garantir sua segurança.

De maneira geral, dentre as causas de ruptura de barragens, destacam-se: a erosão interna (*piping*), resultante da migração de finos no interior da estrutura; a liquefação de materiais, especialmente em barragens de rejeitos; a instabilidade de taludes, decorrente de falhas no dimensionamento ou de alterações nas condições de carregamento; além de falhas na fundação ou em estruturas auxiliares. Diante desses riscos, tornam-se essenciais o monitoramento constante, a manutenção preventiva e a modelagem adequada do comportamento da barragem ao longo de sua vida útil.

A segurança de barragens envolve medidas para garantir a operação segura dessas estruturas. No Brasil, a Lei nº 14.066/2020 reforçou a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), ampliando responsabilidades dos empreendedores, exigindo planos de emergência mais eficazes, inspeções periódicas com critérios mais rígidos e integração com órgãos de defesa civil. Além de fortalecer as atribuições dos órgãos fiscalizadores, como a Agência Nacional de Mineração (ANM), que passou a ter maior poder de sanção e atuação preventiva. Em Minas Gerais, a Lei Estadual nº 23.291/2019 complementa essas diretrizes, reforçando controle, fiscalização e responsabilização dos empreendedores.

Uma barragem de aterro é composta por dois maciços estabilizadores, localizados a montante e a jusante, que têm a função de assegurar a estabilidade do corpo da estrutura. Considerando essa função, é necessário avaliar as condições que influenciam a estabilidade de cada um. No caso do maciço de jusante, sua estabilidade deve ser analisada em regime permanente, ou seja, quando o nível do reservatório se mantém constante por longo período. Durante a fase de construção da barragem de aterro, é preciso avaliar a estabilidade tanto do maciço de montante quanto do de jusante. Já em situações de rebaixamento rápido do nível do reservatório, a atenção deve se concentrar na estabilidade do maciço de montante (ALMEIDA, 2013).

Nesse contexto, é fundamental analisar não apenas as condições usuais de operação, mas também situações extremas que podem comprometer a estabilidade da estrutura. Uma dessas situações críticas é o rebaixamento rápido do nível do reservatório. Esse fenômeno ocorre quando a lâmina d'água é reduzida de forma abrupta, sem permitir tempo suficiente para a dissipação da poropressão no interior do maciço.

Neste trabalho, foi realizado um estudo de caso simulando o rebaixamento rápido do reservatório em dois cenários distintos. No primeiro, considerou-se uma redução de 10 metros do nível d'água ao longo de 10 dias, com acompanhamento da evolução dos fatores de segurança a longo prazo. Em seguida, foi analisado um segundo cenário, o qual simulou-se o rebaixamento total em apenas um dia, com o intuito de representar uma situação emergencial e avaliar os impactos imediatos sobre a estabilidade da estrutura. Ademais, identificou-se a taxa máxima admissível de rebaixamento rápido, de modo que o fator de segurança permanecesse em conformidade com o limite mínimo exigido pela norma. Para isso, foram utilizados dados geotécnicos reais e realizada a modelagem numérica por meio do software Slide2, com simulações em regime permanente e transiente de fluxo.

## 1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos do rebaixamento rápido do reservatório no talude de montante da barragem em estudo.

### 1.1.1. Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- Analisar os fatores de segurança obtidos nos diferentes cenários simulados sob a condição de rebaixamento rápido;
- Avaliar o fator de segurança a longo prazo;
- Comparar os resultados obtidos com o cenário habitual da barragem;
- Verificar se os valores obtidos estão em conformidade com os critérios estabelecidos pelas normas técnicas vigentes;
- Determinar a taxa máxima admissível de rebaixamento rápido para que o fator de segurança fique em conformidade com o limite mínimo estabelecido pela norma.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. CONCEITOS GERAIS SOBRE BARRAGENS

Historicamente, as barragens possibilitaram o armazenamento de água em períodos de abundância para seu uso em épocas de seca. Dessa forma, têm sido fundamentais para o desenvolvimento e a manutenção de cidades e propriedades rurais, além de garantir o fornecimento de alimentos por meio da irrigação das plantações. Uma das barragens mais antigas ainda em operação, construída em terra e enrocamento por volta de 1300 a.C., está localizada na região que atualmente corresponde à Síria (CBDB, 2019).

De acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, considera-se barragem qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso d'água permanente ou temporário, em talvegue ou em cava exaurida com dique, destinada à contenção ou ao armazenamento de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, englobando tanto o barramento quanto as estruturas associadas (BRASIL, 2020).

O Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) define as barragens como estruturas artificiais destinadas à retenção de líquidos, detritos ou rejeitos, com o objetivo de armazenamento e/ou controle. Entre os principais benefícios proporcionados pela construção de barragens destacam-se: o abastecimento de água, a irrigação, a regularização de vazões, a geração de energia elétrica, a contenção de rejeitos, a navegação e o controle de cheias. A classificação dessas estruturas pode variar conforme o critério adotado, considerando aspectos técnicos, funcionais ou de segurança.

Além da finalidade de conter e armazenar os resíduos gerados nos processos de beneficiamento mineral, as barragens também são projetadas para armazenar a água da mina, visando a recuperação e reutilização desse recurso (VICK, 1990). De acordo com Costa (2012), a tecnologia aplicada ao desenvolvimento de soluções para a construção de barragens tem evoluído ao longo do tempo, resultando em diversos tipos de estruturas. O autor destaca, como soluções convencionais, as barragens de terra, de enrocamento e de concreto.

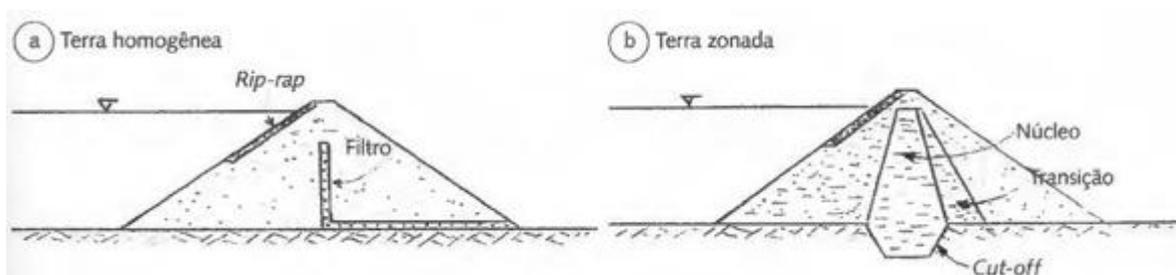
### 2.1.1. Barragens de terra

Segundo Massad (2010), as barragens de terra são constituídas por materiais terrosos compactados, usualmente disponíveis na região, o que reduz os custos com transporte. No Brasil, a ampla presença de solos argilosos e a topografia favorável, marcada por vales largos e fundações com capacidade de suporte compatível com esse tipo de obra, justificam a predominância desse tipo de barragem no país.

As barragens de terra em sua forma mais primitiva eram construídas com solos de baixa permeabilidade dispostos em um perfil homogêneo, sem sistemas de drenagem interna. Essas estruturas mostraram-se vulneráveis a problemas decorrentes da infiltração descontrolada. Por isso, verificou-se que barragens de aterro de maiores dimensões requerem um elemento impermeável ou núcleo de permeabilidade muito baixa, acompanhado de ombros de aterro mais espessos ou enrocamento, a fim de garantir a estabilidade estrutural (NOVAK *et al.*, 2017).

Dessa forma, Costa (2012) classifica as barragens de terra em duas categorias: homogêneas e zonadas. São consideradas homogêneas aquelas construídas predominantemente com um único tipo de material, embora possam ter elementos diversificados, como filtros, *rip-rap* etc., como mostra Figura 1 (a). Enquanto as zonadas apresentam um zoneamento de materiais terrosos, definido conforme suas características físicas ou permeabilidade, representada na Figura 1 (b).

Figura 1 – Barragens de terra.



Fonte: modificado de COSTA (2012).

Barragens de terra demandam cuidados específicos relacionados ao fluxo de água dentro do maciço, uma vez que a erosão interna, conhecida como *piping*, é uma das principais causas de instabilidade dessas estruturas. Portanto, é imprescindível a implementação de sistemas eficientes de drenagem, filtros projetados adequadamente e a definição clara de zonas de

transição, garantindo assim a estabilidade e a durabilidade da barragem (FOSTER et al., 2000; FELL et al., 2003).

### **2.1.2. Barragens de enrocamento**

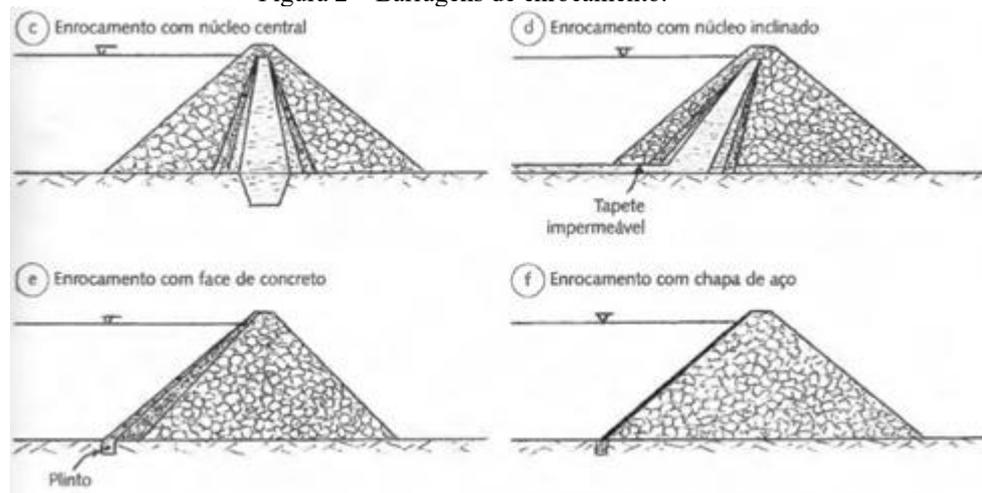
As barragens de enrocamento são constituídas por blocos de rochas que podem ser dispostos de maneira compactada ou simplesmente lançados em camadas, formando um maciço resistente e estável. Esse tipo de barragem é especialmente vantajoso em regiões com grande disponibilidade de material rochoso oriundo de escavações obrigatórias, como em projetos hidrelétricos, e onde deseja a aceleração do cronograma de construção mesmo sob condições climáticas adversas (MASSAD, 2010).

Devido à sua alta permeabilidade, essas estruturas necessitam de um elemento adicional de vedação para assegurar a estanqueidade. A localização e o tipo desse elemento determinam a classificação da barragem. De acordo com Costa (2012), nas barragens com núcleo impermeável, o material predominante é o rochoso, enquanto a vedação da água é realizada por um núcleo argiloso, que fica separado do enrocamento por zonas de transição, prevenindo a migração do material fino para o interior do enrocamento. Esse núcleo pode estar localizado de forma centralizada ou inclinado em direção ao interior do enrocamento. Já nas barragens com face impermeável, a vedação é garantida pela impermeabilização da face de montante, que pode ser composta por uma camada de asfalto, uma placa de concreto ou uma chapa de aço.

A Figura 2 apresenta as barragens de enrocamento com núcleo central (c) e núcleo inclinado (d), além de ilustrar os tipos possíveis de vedação, incluindo face de concreto (e) e chapa de aço (f).

Segundo Novak et al. (2017), as vantagens das barragens de enrocamento decorrem da alta resistência ao cisalhamento do material, aliada à sua elevada permeabilidade, o que pode eliminar problemas relacionados à poropressão e possibilitar taludes mais íngremes.

Figura 2 – Barragens de enrocamento.



Fonte: modificado de COSTA (2012).

### 2.1.3. Barragens de rejeitos

As barragens de rejeitos são estruturas projetadas para conter os resíduos gerados no processo de beneficiamento de minérios (CRUZ, 2004). Segundo Lima (2009), o dimensionamento de barragens deve levar em conta tanto o volume quanto as características específicas do rejeito. Quando este apresenta textura argilosa, o dimensionamento dependerá da estimativa de sua consolidação deste material, processo que, gradualmente, libera espaço útil na estrutura para a deposição de novos rejeitos.

A maneira de disposição do rejeito exerce influência direta sobre a segurança da barragem. Aspectos como a segregação de partículas, a presença de finos, variações no teor de umidade e deficiências no sistema de drenagem podem favorecer a ocorrência de instabilidades hidráulicas, destacando-se o *piping*, considerado uma das principais causas de ruptura nesse tipo de estrutura (FOSTER *et al.*, 2000; FELL *et al.*, 2003).

Cruz (2004) ressalta que geralmente a construção das barragens de rejeito ocorre em etapas, com os alteamentos adaptados às necessidades da mina. Para esse processo, podem ser empregados materiais de empréstimo, material compactado provenientes de áreas próximas ou o próprio rejeito.

Nesse contexto, é bastante comum o uso de rejeitos nos alteamentos, em razão de seu baixo custo, facilidade de execução e ampla disponibilidade do material. Entretanto, para que o rejeito possa ser utilizado na construção da barragem, é necessário realizar a separação de suas frações, já que as partículas finas não são adequadas devido à baixa resistência ao

cisalhamento e à elevada compressibilidade. Assim, a ciclonagem é frequentemente utilizada para separar os componentes de maior diâmetro (LIMA, 2009).

Conforme Machado (2007), a geometria de uma barragem de rejeitos é influenciada pela topografia do local, podendo ser implantada aproveitando o perfil de vales existentes, o que facilita a formação da lagoa. O solo selecionado deve apresentar capacidade de suporte adequada para evitar deslizamentos ou grandes acomodamentos devido ao peso do rejeito a cada alteamento. O autor ainda ressalta que se deve evitar a construção sobre nascentes, já que a pressão da água pode comprometer a estabilidade do aterro.

Devido à necessidade de aumentar o armazenamento, são feitos alteamentos para ampliar a capacidade da barragem, e são classificados conforme a direção em que são realizados em relação ao dique original. Esses alteamentos podem ser a montante, a jusante e por linha de centro (VICK, 1990).

O método a montante, embora mais econômico, apresenta maior risco, pois os novos diques são construídos sobre o próprio rejeito previamente depositado, que pode não estar totalmente consolidado. Por sua vez, o alteamento a jusante é considerado mais seguro, uma vez que os diques subsequentes são construídos sobre material compactado e estruturalmente estabilizado. O método por linha de centro constitui uma solução intermediária, com os diques alinhados à crista da estrutura original (FELL *et al.*, 2003).

## 2.2. AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE FÍSICA

A avaliação da estabilidade de barragens de terra e enrocamento exige a análise da resistência dos taludes quanto a possíveis escorregamentos. Para isso, é fundamental definir previamente as condições de projeto ou condições de carregamento, que correspondem aos diferentes estados aos quais a estrutura pode ser submetida ao longo de sua vida útil. Em seguida, realizam-se análises específicas para cada uma dessas situações, visando garantir a segurança da barragem (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003).

De acordo com o Ministério da Integração Nacional (2002), os taludes do reservatório devem manter-se estáveis mesmo sob condições críticas, como carregamentos sísmicos, precipitações intensas, rebaixamento rápido do nível d'água e quaisquer outras situações que possam provocar rupturas capazes de gerar ondas com potencial de comprometer a segurança pública, a integridade da barragem ou de suas estruturas auxiliares.

Embora o Brasil esteja localizado em uma zona considerada assísmica, recomenda-se a realização da análise de estabilidade de taludes sob a ação de sismos, devido à possibilidade de ocorrência de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório da própria barragem. Para essa avaliação, devem ser consideradas cargas sísmicas correspondentes a 0,05 g na direção horizontal e 0,03 g na direção vertical (ELETROBRÁS, 2003).

Segundo Simangunsong *et al.* (2024), a detonação é uma técnica comumente utilizada em operações de mineração a céu aberto que emprega explosivos para quebrar rochas em seu estado natural em fragmentos menores, o que facilita o carregamento e o transporte. No entanto, as operações de detonação podem gerar ondas sísmicas que se propagam pela massa rochosa do talude por meio de vibrações e acelerações, podendo comprometer a integridade estrutural de alguma estrutura próxima. Por isso, em projetos e monitoramento de estruturas geotécnicas próximas a áreas de mineração, costuma-se avaliar vibrações induzidas por explosivos de forma semelhante à análise sísmica.

Segundo Pimenta (2005), a análise de estabilidade consiste em um conjunto de procedimentos destinados a determinar um índice ou uma grandeza que quantifique o grau de proximidade de um talude em relação à ruptura, considerando um conjunto específico de condicionantes, como pressões neutras, sobrecargas, geometria, entre outros.

Os métodos de análise da estabilidade de taludes têm como finalidade fornecer estimativas realistas das principais variáveis envolvidas, resultando em fatores de segurança adequados às diversas condições de carregamento. O fator de segurança representa a relação entre as resistências mobilizadas e as solicitações atuantes, sendo expresso como um coeficiente aplicado ao modelo de cálculo adotado (SOARES, 1996).

Nesse contexto, Silva (2019) definiu o fator de segurança pela Equação 1.

$$FS = \frac{\tau_{res}}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Sendo:

FS o fator de segurança em relação a resistência;

$\tau_{res}$  a tensão cisalhante resistente;

$\tau_{mob}$  a tensão cisalhante mobilizada;

A Tabela 1 apresenta os fatores mínimos de segurança considerados aceitáveis nas análises de estabilidade de taludes. Em situações específicas, valores inferiores podem ser admitidos, desde que devidamente justificados. A aceitação dos fatores de segurança obtidos deve considerar a confiabilidade dos dados utilizados, a adequação e as limitações dos métodos de análise adotados, a magnitude das deformações previstas e as possíveis consequências associadas a uma eventual ruptura.

Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração.

<b>Fase</b>	<b>Tipo de ruptura</b>	<b>Fator de segurança mínimo</b>
Final de construção <sup>a</sup>	Maciço e fundações	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	1,1
Operação com rede de fluxo em condição de N.A do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor)	Maciço	1,5
Operação com rede de fluxo em condição de N.A do reservatório correspondente ao máximo normal com resistência não drenada de pico <sup>b</sup>	Maciço e fundações	1,3
Solicitação sísmica, em condição de N.A do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor) <sup>c</sup>	Maciço e fundações	1,1

<sup>a</sup> Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como final de construção, devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.

<sup>b</sup> Aplicável em análises sem presença de materiais com comportamento de strain-softening (amolecimento brusco em condições não drenadas). Para materiais com comportamento de strain-softening, as análises de estabilidade devem ser complementadas por meio de análise T-D utilizando modelos constitutivos que sejam capazes de reproduzir este fenômeno

<sup>c</sup> A análise pseudoestática é uma abordagem simplificada de equilíbrio limite, sendo que deve ser complementada por análises de tensão-deformação (condições dinâmicas), a critério e julgamento de engenharia apropriado ou quando os valores de fatores de segurança obtidos estiverem muito próximos ou inferiores do valor mínimo recomendado

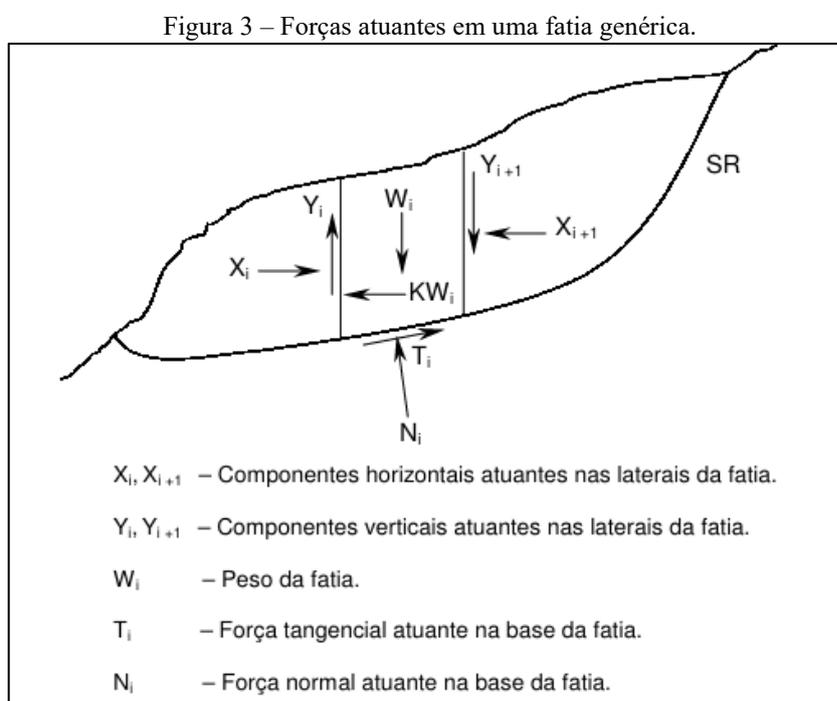
Fonte: ABNT NBR 13028 (2024).

De acordo com Brasil (2002), os taludes do reservatório devem manter estáveis mesmo sob condições críticas, como carregamentos sísmicos, chuvas intensas, rebaixamento rápido do lençol freático ou quaisquer outras situações que possam provocar rupturas capazes de gerar ondas que comprometam a segurança pública, a barragem ou suas estruturas associadas.

A maioria das análises de estabilidade foi desenvolvida com base na teoria do equilíbrio limite. Essa abordagem, fundamentada na teoria da plasticidade, considera o equilíbrio de corpos sujeitos a ruptura, assumindo a existência prévia de uma superfície de escorregamento definida (planar, circular, composta, entre outras) e adotando a lei de resistência ao cisalhamento de Coulomb ao longo dessa superfície. De modo geral, essas análises são

realizadas em duas dimensões, considerando uma seção representativa do maciço limitada por dois planos verticais e paralelos, com espessura unitária (BUENO; VILAR, 1985).

O método do equilíbrio limite, que incorpora o conceito do método das fatias na análise da estabilidade global de taludes, é fundamentado nos princípios da estática, considerando o equilíbrio de forças e momentos. Sua aplicação se dá por meio de duas etapas principais: primeiramente, define-se uma superfície de ruptura potencial e, em seguida, a massa de solo situada acima dessa superfície é segmentada em fatias verticais. Posteriormente, avalia-se o equilíbrio comparando-se as forças solicitantes que atuam ao longo da superfície de ruptura com as forças resistentes ao cisalhamento presentes na base de cada fatia (SANTOS, 2021). A Figura 3 indica as forças atuantes em uma fatia genérica.



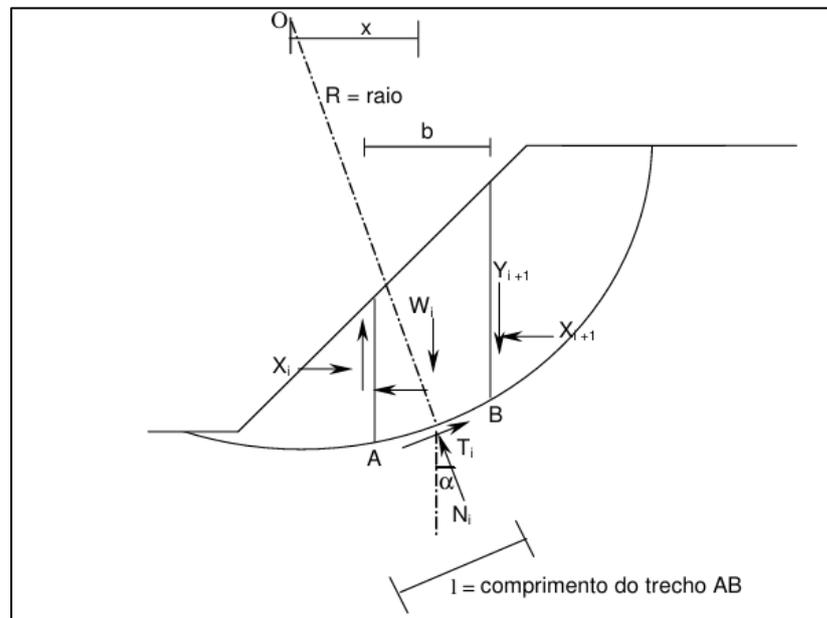
Fonte: FABRÍCIO (2006).

### 2.2.1. Método de Fellenius

O método de Fellenius foi desenvolvido em 1936 pelo engenheiro sueco Fellenius. Segundo Telles (2015), esse método é classificado como uma abordagem simplificada para a análise de estabilidade, pois não satisfaz as três equações do equilíbrio estático. Na determinação do fator de segurança, Fellenius leva em conta apenas o equilíbrio de forças na direção normal à superfície de deslizamento e o equilíbrio de momentos.

Neste método, todos os esforços entre as fatias são desconsiderados. O peso de cada fatia é decomposto em componentes paralelas e perpendiculares à sua base, como mostrado na Figura 4. A força perpendicular corresponde à força normal, utilizada para calcular a resistência ao cisalhamento disponível. Já a componente paralela representa a força motriz gravitacional. Para determinar o fator de segurança, realiza-se também a soma dos momentos em torno de um ponto localizado na superfície de deslizamento em análise. Esse fator é definido como a razão entre a resistência ao cisalhamento total disponível ao longo da superfície de deslizamento e a soma das forças motrizes gravitacionais, conforme demonstrado na Equação 2 (GEO-SLOPE, 2022).

Figura 4 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Fellenius.



Fonte: FABRÍCIO (2006).

$$FS = \frac{\sum(c'l + (W_i \cos \alpha - ul)tg\phi')}{\sum W_i \sin \alpha} \quad (2)$$

Onde:

$FS$  é o fator de segurança (adimensional);

$c'$  é a coesão do solo [kPa];

$\phi'$  é o ângulo de atrito;

$l$  é o comprimento da base da fatia [m];

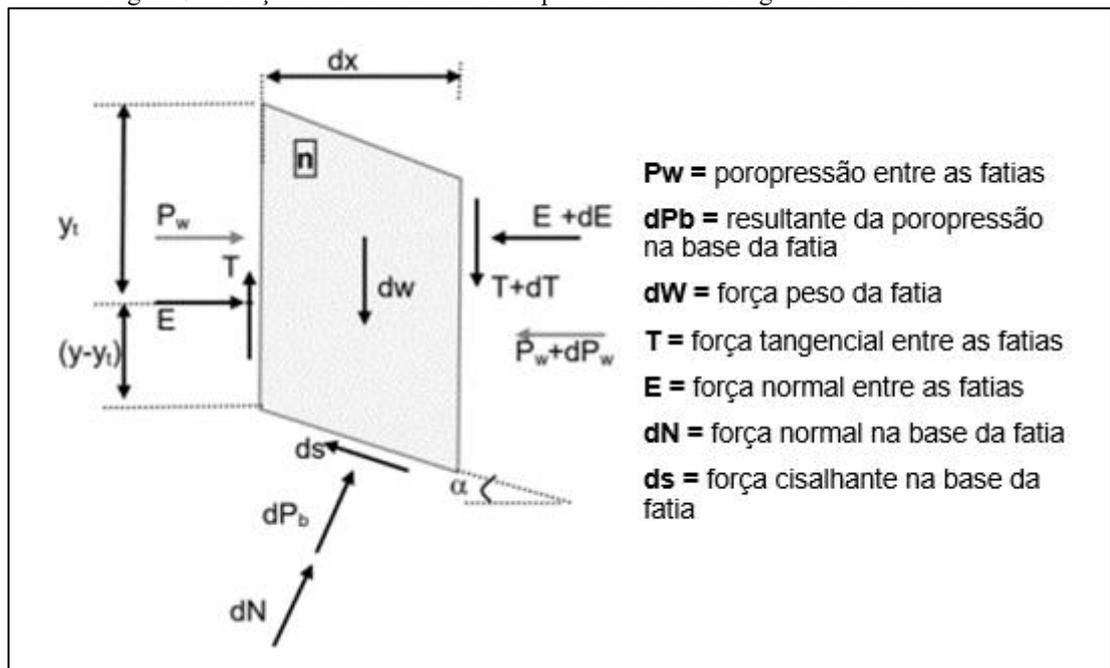
$\alpha$  é inclinação da base da fatia;

$W_i$  é o peso da n-ésima fatia [kN];  
 $u$  é a força de percolação [kN].

### 2.2.2. Método de Morgenstern-Price

O método de Morgenstern-Price foi desenvolvido no ano de 1965 e é uma abordagem rigorosa para análise da estabilidade de taludes, aplicável a qualquer forma de superfície de ruptura. Ele atende simultaneamente às condições de equilíbrio de forças e de momentos, o que o torna um dos métodos mais empregados em análises de estabilidade. A massa de solo potencialmente instável é dividida em fatias infinitesimais, e os cálculos necessários exigem o uso de computador devido à sua complexidade (FABRICIO, 2006). As forças consideradas atuando sobre cada fatia estão ilustradas na Figura 5.

Figura 5 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Morgenstern-Price.



Fonte: modificado de GERSCOVICH (2012).

Para resolver a indeterminação do problema, admite-se uma relação entre as forças  $E$  e  $T$ , conforme demonstrado na Equação 3.

$$T = \lambda \times f(x) \times E \quad (3)$$

Onde:

$T$  é a força tangencial entre as fatias;

$E$  é a força normal entre as fatias;

$\lambda$  é a constante a ser determinada no processo iterativo;

$f(x)$  é a função que precisa ser especificada.

Segundo Fabrício (2006), geralmente, adota-se a função arco seno para representar  $f(x)$ , por ser aquela que, segundo Morgenstern-Price (1965), exerce a menor influência sobre o valor final do fator de segurança. No entanto, outras formas de  $f(x)$  também podem ser utilizadas, como funções constantes, arco seno incompleto, trapezoidal ou qualquer outra configuração conveniente.

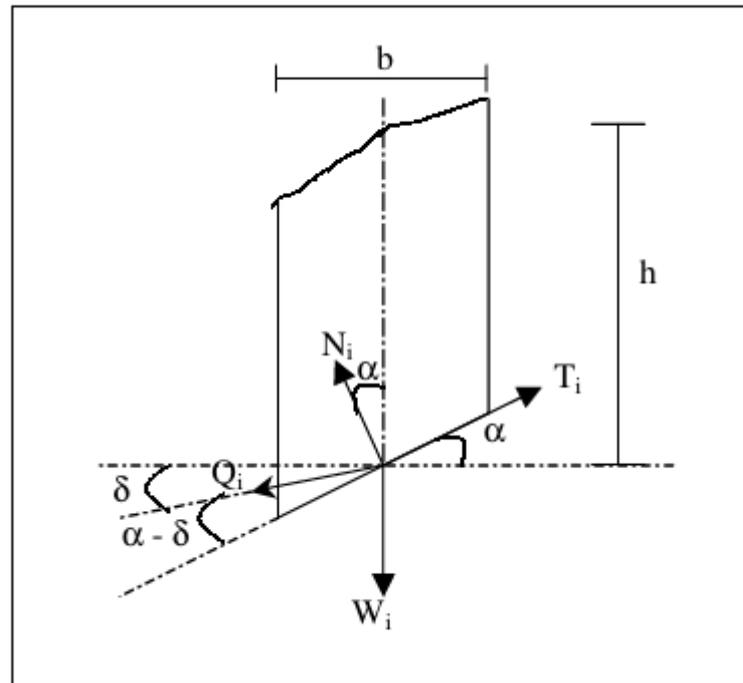
### 2.2.3. Método de Spencer

Segundo Cruz (2004), o método de Spencer é classificado como rigoroso por satisfazer todas as equações de equilíbrio de forças e de momentos. Embora tenha sido originalmente aplicado a superfícies de ruptura circulares, sua formulação foi posteriormente estendida para abranger superfícies com geometrias irregulares.

Esse método foi desenvolvido por Spencer em 1967 e considera que as forças de interação entre as fatias são paralelas, ou seja, possuem a mesma inclinação. O valor desse ângulo não é previamente definido, mas determinado como parte da solução do problema. O procedimento de cálculo é iterativo, envolvendo a adoção inicial de valores para o fator de segurança e para a inclinação das forças, repetindo-se os cálculos até que o equilíbrio de forças e momentos seja alcançado em todas as fatias. Por incorporar o equilíbrio completo em sua formulação, é classificado como um método rigoroso. No entanto, exige maior esforço computacional e pode ser aplicado tanto a superfícies de ruptura circulares quanto não circulares (USACE, 2003).

Spencer assumiu que as forças  $X_i, Y_i$ , e  $X_{i+1}, Y_{i+1}$  poderiam ser representadas por uma força resultante  $Q_i$ , inclinada de um ângulo  $\delta$  em relação à horizontal. Considerando o equilíbrio de momentos e desconsiderando a presença de componente sísmica, a força  $Q_i$  deve atuar passando pelo ponto de interseção das forças  $W_i, T_i$  e  $N_i$ , ou seja, pelo ponto médio da base da fatia (FABRICIO, 2006). Essa abordagem está ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer.



Fonte: FABRÍCIO (2006).

Ao impor o equilíbrio de forças nas direções normal e tangencial à base da fatia, e aplicando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, obtém-se a Equação 4.

$$Q = \frac{\frac{c \cdot b \cdot \sin \alpha}{FS} + \frac{\tan \phi' (h \cos \alpha - u b \sec \alpha)}{FS} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \delta) \left[ 1 + \frac{\tan \phi \tan(\alpha - \delta)}{FS} \right]} \quad (4)$$

Supondo que não existam forças externas atuando sobre o talude, o somatório das forças internas da massa de solo potencialmente instável é nulo.

$$\sum Q \cos \delta = 0 \quad (5)$$

$$\sum Q \sin \delta = 0 \quad (6)$$

Como o somatório dos momentos das forças externas em relação ao ponto O (centro de rotação) é nulo, a soma dos momentos das forças de interação entre as fatias em relação a esse mesmo ponto também deve ser igual a zero.

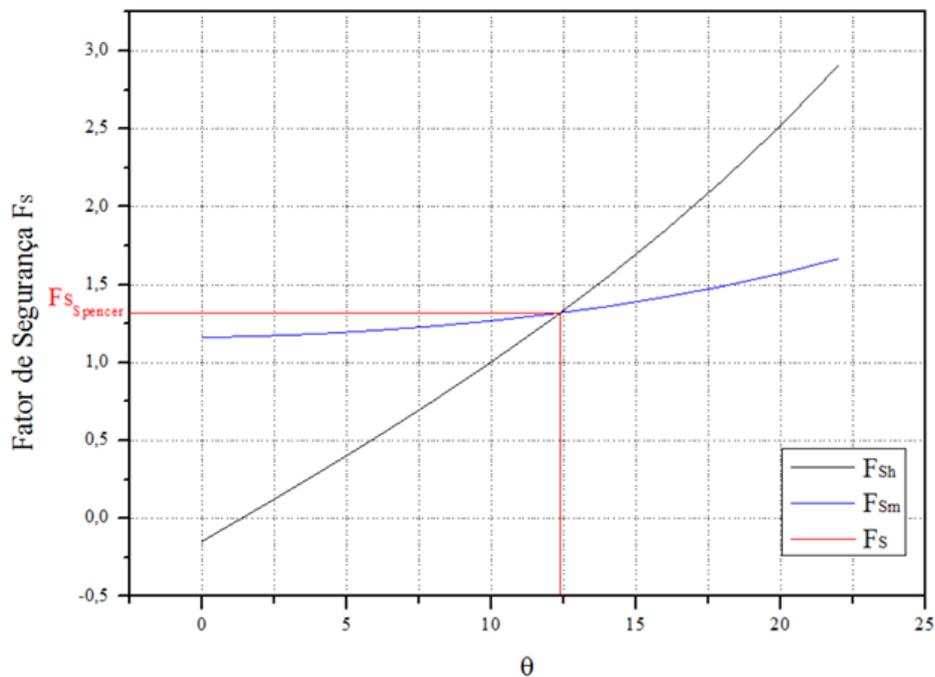
$$\sum Q R \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (7)$$

Como a superfície de ruptura é circular, o R (raio) é constante, e adotando o ângulo  $\delta$  constante para todas as fatias, as Equações 5 e 6 se reduzem para a Equação 8.

$$\sum Q = 0 \quad (8)$$

A partir das Equações 7 e 8, e variando o ângulo  $\delta$ , obtêm-se dois valores distintos para o fator de segurança: um com base na equação de equilíbrio de forças e outro com base na equação de equilíbrio de momentos, conforme ilustrado pelas curvas da Figura 7. O ponto em que essas curvas se intersectam corresponde ao fator de segurança que satisfaz simultaneamente ambas as equações (FABRICIO, 2006).

Figura 7 – Determinação gráfica do fator de segurança pelo método de Spencer.



Fonte: PEREIRA (2013).

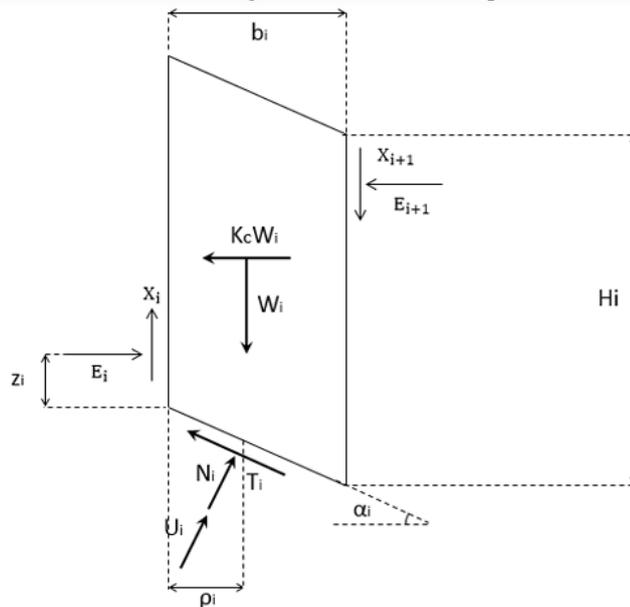
#### 2.2.4. Método de Sarma

O método de Sarma (1973 apud OLIVEIRA, 2014) trata-se de um método rigoroso, uma vez que satisfaz simultaneamente as condições de equilíbrio de forças e de momentos, conforme

ilustrado na Figura 8. Distingue-se das demais abordagens por introduzir um coeficiente de aceleração horizontal ( $K_c$ ), denominado como aceleração de Sarma. Esse coeficiente contribui para a força solicitante e atua no centro de massa da fatia. Pode-se definir  $K_c$  como sendo o valor de aceleração horizontal necessário para tornar iminente a ruptura da massa de solo, isto é, aquela que reduz o fator de segurança ao valor unitário. Por outro lado, a um valor nulo de  $K_c$  corresponde o fator de segurança estático.

Segundo Oliveira (2014), este método também adota uma função pré-definida para a distribuição das forças normais e tangenciais entre as fatias. Dessa forma, o valor do coeficiente de aceleração pode ser calculado diretamente a partir de um fator de segurança previamente assumido. Fabrício (2006) destaca que a grande vantagem desse método sobre o de Morgenstern-Price é o fato de o fator de segurança poder ser obtido através de planilhas eletrônicas ou com auxílio de uma calculadora, e não precisar de um programa para resolvê-lo.

Figura 8 – Forças atuantes numa fatia genérica consideradas pelo Método de Sarma.



Fonte: OLIVEIRA (2014).

### 2.3. SEGURANÇA DE BARRAGEM

A segurança de barragens envolve um conjunto de metodologias que visam garantir a operação segura dessas estruturas. O objetivo é preservar a integridade geotécnica, hidráulica e estrutural, além de mitigar os riscos associados à operação. Apesar dos avanços, desafios persistem na análise de risco e na gestão de segurança, como apontam Vallero & Letcher (2012).

Eles ressaltam que os desastres envolvendo essas estruturas evidenciam a dificuldade em avaliar e gerir os riscos e tipos de falhas que podem ocorrer em situações extremas.

A percepção dos riscos pela sociedade tem evoluído, tornando inaceitável a falta de tratamento adequado para essas ameaças. Assim, cresce a exigência por maior preparo tanto por parte dos proprietários de barragens, que precisam ir além do cumprimento das normas técnicas, quanto das autoridades, que devem aprimorar mecanismos regulatórios e sistemas de monitoramento (LEITE, 2019).

No Brasil, a segurança das barragens é regulamentada por um conjunto de leis e normas que estabelecem diretrizes específicas para a construção, operação, monitoramento e descaracterização dessas estruturas. A partir de 1983, o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) publicou documentos técnicos com recomendações sobre inspeções, instrumentação e procedimentos de operação em barragens. Entretanto, somente dia 20 de setembro de 2010, foi publicada a Lei nº 12.334, a qual estabelece diretrizes para a construção, operação, manutenção e desativação de barragens, definindo as responsabilidades de empreendedores e órgãos fiscalizadores (BRASIL, 2010).

Segundo a Agência Nacional de Águas (2016), a Lei nº 12.334/2010 definiu, como um instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens, o Plano de Segurança da Barragem (PSB), com o objetivo de auxiliar o empreendedor na gestão da segurança da barragem. O PSB deve conter, além das informações gerais e dados técnicos, a documentação de operação, manutenção, monitoramento, instrumentação e inspeção, e deve ser atualizado a intervalos regulares. O plano precisa abranger informações suficientes e adequadas para permitir operar a barragem e mantê-la em condições seguras, bem como monitorar o seu desempenho, de modo a detectar qualquer anomalia.

Essa lei também determinou a criação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), responsável pela coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de dados sobre barragens em construção, operação ou desativadas. A legislação instituiu também a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que estabelece a classificação das barragens em operação com base no risco e no dano potencial. Conforme essa classificação, tornou-se obrigatória a elaboração de um Plano de Ação de Emergência (PAE) para barragens com maior potencial de risco.

A PNSB (Brasil, 2010), define a Agência Nacional de Águas (ANA) como instituição responsável por fiscalizar a segurança de barragens de acumulação de água localizadas em rios de domínio da União para as quais emitiu outorga, com exceção daquelas utilizadas para a

geração de energia elétrica, que são fiscalizadas por outras entidades, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (BRASIL, 2010).

A Lei nº 14.066 (Brasil, 2020), sancionada em 30 de setembro de 2020, foi criada como uma atualização da PNSB, com o objetivo de reforçar a fiscalização e implementar novas medidas de segurança após os trágicos acidentes de rompimento de barragens, como os de Mariana e Brumadinho. Essa lei estabelece diretrizes mais rígidas para a segurança das barragens, tendo como destaque a proibição do método de construção de alteamento a montante (Brasil, 2020). Além disso, a lei estabelece prazos para o descomissionamento das barragens construídas por esse método e determina que aquelas que não atendam aos critérios de segurança devem ser descaracterizadas.

A Agência Nacional de Mineração (ANM) é o órgão responsável pela fiscalização e regulação das barragens de mineração no âmbito federal, conforme o Decreto nº 9.587/2018, que lhe conferiu atribuições específicas após sua criação. A ANM atua no cadastramento das estruturas, análise dos relatórios de estabilidade, verificação do cumprimento dos requisitos legais e aplicação de sanções administrativas.

Após o rompimento da barragem em Brumadinho, a ANM passou a exigir Declarações de Condição de Estabilidade (DCE) com frequência semestral e a manter um Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), com dados abertos ao público.

No contexto do Estado de Minas Gerais, que concentra grande parte das barragens de rejeito do país, a Lei Estadual nº 23.291/2019 instituiu a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB). Essa legislação foi elaborada após o desastre de Brumadinho e visa reforçar os mecanismos de controle, fiscalização e responsabilização dos empreendedores.

A lei fortalece o licenciamento ambiental, exigindo a modalidade trifásica (licença prévia, de instalação e de operação) e a apresentação de estudos de impacto ambiental (EIA/RIMA) para a construção, ampliação e alteamento de barragens. Além disso, uma medida inovadora é a vedação de novas licenças para barragens cujos cenários de ruptura identifiquem comunidades na zona de autossalvamento, área que não permite tempo para uma evacuação segura.

Para garantir a conformidade e a segurança contínua, a Lei nº 23.291/2019 estabelece a obrigatoriedade de auditorias técnicas de segurança periódicas, custeadas pelos próprios empreendedores. O Plano de Ação de Emergência (PAE) também se torna um documento fundamental, exigindo detalhamento das ações em caso de sinistro e a comunicação efetiva com as comunidades a jusante. Ademais, o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

(Sisema) passa a realizar vistorias periódicas, especialmente em barragens de alto potencial de dano.

Paralelamente à legislação, normas técnicas da ABNT, como a NBR 13028:2024, estabelecem requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projetos de barragens de mineração, contemplando estudos técnicos, critérios de estabilidade, sistemas de drenagem, instrumentação e planos de fechamento e desativação. Essa norma define os elementos essenciais para a elaboração do PSB, com o objetivo de assegurar a integridade da estrutura em todas as fases de sua vida útil, desde o projeto até o descomissionamento.

Segundo Fonseca (2003), a auscultação de uma barragem refere-se ao conjunto de processos que visam a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições de sua segurança global. A auscultação pode ser feita por inspeções visuais, que é o processo da auscultação qualitativa, através de vistorias periódicas de campo e pela instrumentação, que é o processo de aquisição, registro e processamento sistemático dos dados obtidos a partir dos instrumentos instalados no aterro ou nas fundações da barragem.

#### 2.4. ESTUDO DA PERCOLAÇÃO

A erosão interna, também conhecida como *piping*, constitui uma das principais causas de instabilidade em barragens de terra e enrocamento. Esse fenômeno ocorre quando partículas do solo são carregadas pela percolação da água, formando canais internos que comprometem progressivamente a estrutura, podendo levar ao seu colapso (FELL *et al.*, 2003).

Em barragens de terra e de rejeitos, áreas de maior permeabilidade, descontinuidades ou materiais mal compactados podem conduzir o fluxo da percolação para trajetórias preferenciais, resultando em concentrações localizadas de poropressão e no aumento dos esforços de arraste. Esse cenário favorece a mobilização de partículas finas, sobretudo na ausência de filtros ou zonas de transição eficazes, configurando-se como um dos principais fatores desencadeadores da erosão interna. Portanto, o fluxo não apenas precede os demais mecanismos de instabilidade, como também os influencia diretamente, atuando como elo entre a pressão hidrostática, os gradientes hidráulicos e as propriedades do solo (CONCEIÇÃO, 2025).

Desse modo, a análise de percolação torna-se fundamental para a previsão e mitigação de riscos associados à instabilidade hidráulica em projetos de barragens. O Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003) destaca que as análises têm como objetivo estimar a distribuição das pressões e os valores das vazões no interior do maciço, nas fundações e demais áreas de interesse, de forma a subsidiar os estudos de estabilidade, o dimensionamento dos dispositivos de drenagem interna, bem como a seleção e o dimensionamento dos sistemas de impermeabilização e drenagem da fundação. Para a elaboração de qualquer análise de percolação, o modelo hidrogeotécnico dos maciços é a base fundamental.

As análises de percolação são realizadas para as condições de reservatório em operação e de rebaixamento rápido. Na condição do reservatório em operação, o nível de água a montante deve ser o máximo normal e, a jusante da barragem, o nível é o mínimo. Já na condição de rebaixamento rápido, são considerados os níveis máximo e mínimo previstos do reservatório (ELETROBRÁS, 2003).

Fell *et al.* (2014) e Seequent (2023) descrevem que a percolação é provocada pela diferença de carga hidráulica entre montante e jusante da estrutura, sendo descrita pela equação de Darcy, a qual relaciona a velocidade do fluxo à condutividade hidráulica do solo e ao gradiente hidráulico aplicado.

#### 2.4.1. Lei de Darcy

A Lei de Darcy representa a relação entre a vazão do fluxo de um fluido através de um meio poroso e o gradiente hidráulico que impulsiona esse fluxo. É a função básica para estimar a velocidade de descarga durante a percolação. Segundo Pinto (2006), pela Lei de Darcy (1856), a vazão de percolação pode ser estimada pela Equação 9.

$$Q = k_s \cdot i \cdot A \quad (9)$$

Onde:

Q = vazão de percolação

$k_s$  = coeficiente de permeabilidade saturado

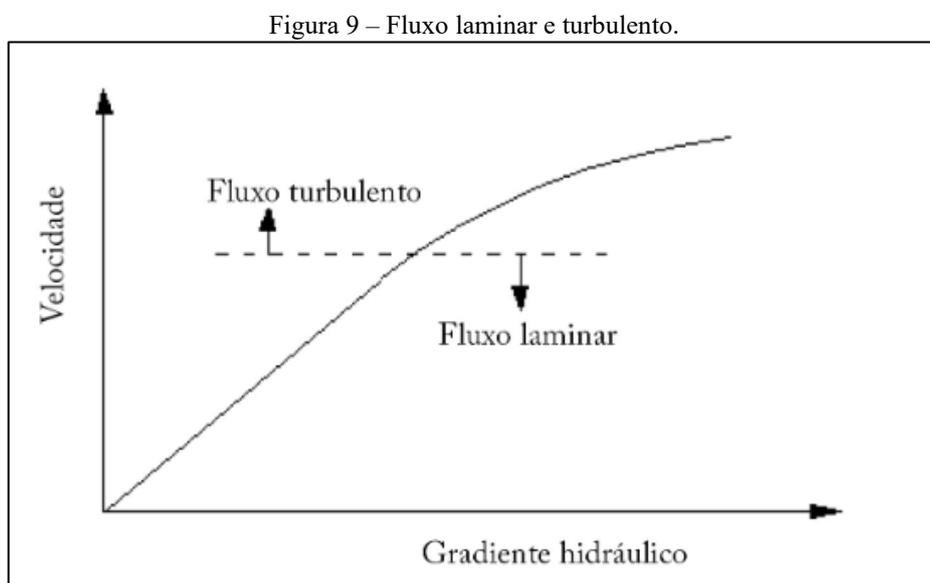
$i$  = gradiente hidráulico

A = área de seção transversal do solo onde a água percola

A lei foi baseada em experimentos com o fluxo de água por leitos de areia e estabelece que a velocidade de descarga da água em regime de escoamento laminar é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, ou seja, à perda de carga por comprimento da amostra. Entretanto, a proporcionalidade entre a velocidade do escoamento e o gradiente hidráulico, estabelecida pela lei de Darcy, é característica dos escoamentos laminares, conforme demonstrado posteriormente pelos estudos de Reynolds. O número de Reynolds, inclusive, é utilizado na Mecânica dos Fluidos como critério para distinguir escoamentos laminares de escoamentos turbulentos (NOVAIS, 1985; FERNANDES, 2009).

Segundo Fernandes (2009), na maioria dos maciços terrosos, os escoamentos apresentam velocidades extremamente baixas, resultando em números de Reynolds também muito baixos, o que torna plenamente válida a hipótese de escoamento laminar. No entanto, escoamentos turbulentos podem ocorrer em alguns solos muito grosseiros, como pedregulhos limpos.

A Figura 9 ilustra a relação entre a velocidade do escoamento e o gradiente hidráulico. No caso de escoamento laminar, isto é, quando as trajetórias das partículas de água não se cruzam, essa relação é linear. Por outro lado, em escoamento turbulento, essa linearidade deixa de existir (MURRIETA, 2009).



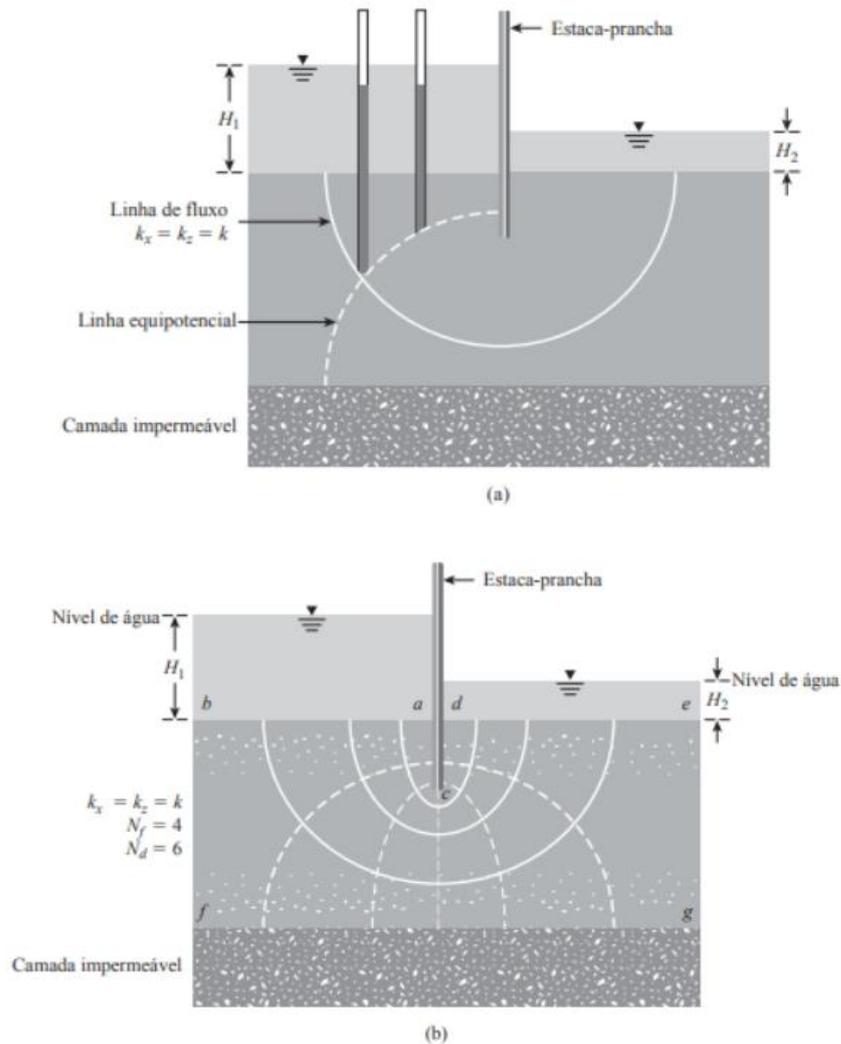
Fonte: MURRIETA (2009).

### 2.4.2. Rede de fluxo

Segundo Das e Sobhan (2014), uma combinação de uma série de linhas de fluxo e linhas equipotenciais é chamada de rede de fluxo. A Figura 10 (a) demonstra a definição de fluxo e linhas equipotenciais para o fluxo na camada permeável. Massad (2010) destaca que, pelo fato de o regime ser laminar as linhas de fluxo não podem se cruzar, conclusão que é constatada experimentalmente. Por outro lado, como há uma perda de carga no percurso, haverá pontos em que uma determinada fração de carga total já terá sido consumida. O lugar geométrico dos pontos com igual carga total é uma equipotencial, ou linha equipotencial.

A rede de fluxo apresenta uma quantidade  $N_f$  de canais de fluxo, que são intervalos com mesma vazão entre as linhas de fluxo, e  $N_d$  de intervalos entre equipotenciais. À medida que se afastam do centro, as linhas de fluxo se distanciam, acompanhando o espaçamento das equipotenciais. Esse aumento ocorre porque o afastamento das equipotenciais indica menores cargas hidráulicas, exigindo que os intervalos entre as linhas de fluxo se ampliem para ajustar a velocidade da água e garantir a vazão, conforme a Lei de Darcy (PINTO, 2006). A Figura 10 (b) mostra um exemplo de rede de fluxo completa. Traçada a rede de fluxo é possível obter a perda de carga entre equipotenciais, o gradiente hidráulico e a vazão.

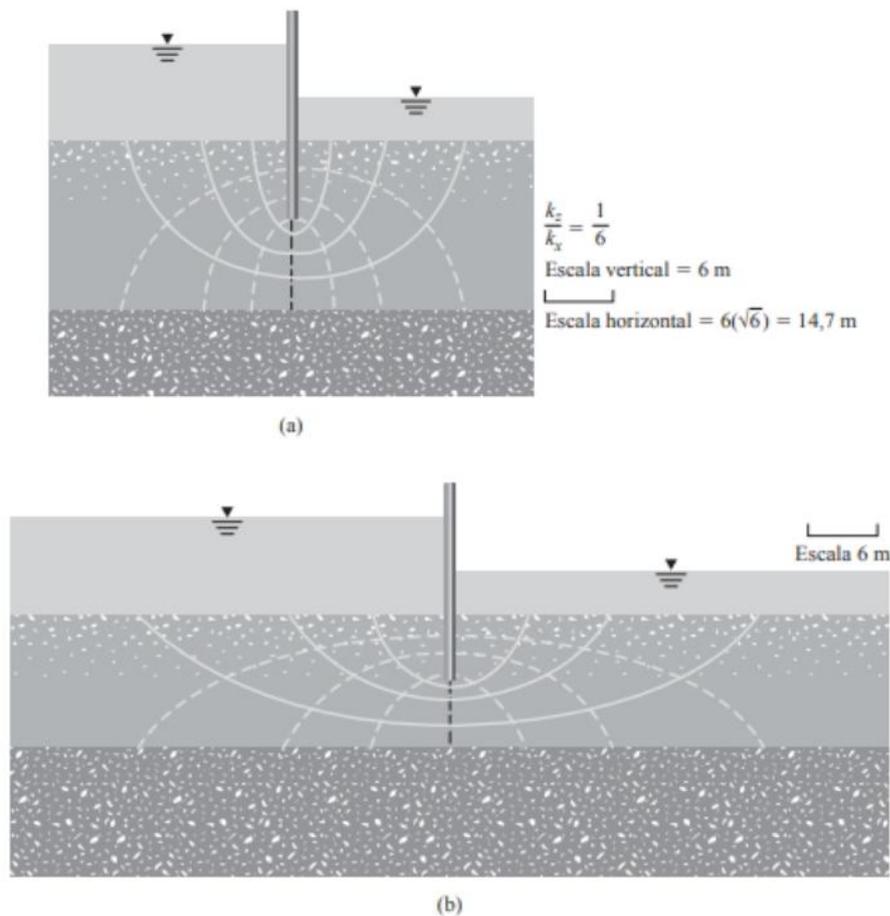
Figura 10 – (a) Definição de linhas de fluxo e linhas equipotenciais; (b) rede de fluxo finalizado.



Conforme Pinto (2006), o fluxo de água em um meio isotrópico apresenta o mesmo coeficiente de permeabilidade em todas as direções. Nessa situação, as linhas de fluxo e as equipotenciais assumem formas retas ou arcos de circunferência regulares, indicando um escoamento uniforme e isotrópico. O fluxo segue o caminho de maior carga hidráulica.

Entretanto, segundo Das e Sobhan (2014), a maioria dos solos na natureza apresenta algum grau de anisotropia. Para levar em conta essa característica em relação à condutividade hidráulica, é necessário ajustar o traçado da rede de fluxo, resultando em linhas de fluxo e equipotenciais que seguem curvas irregulares, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Um elemento de fluxo em solo anisotrópico: (a) na seção transformada; (b) na seção real.

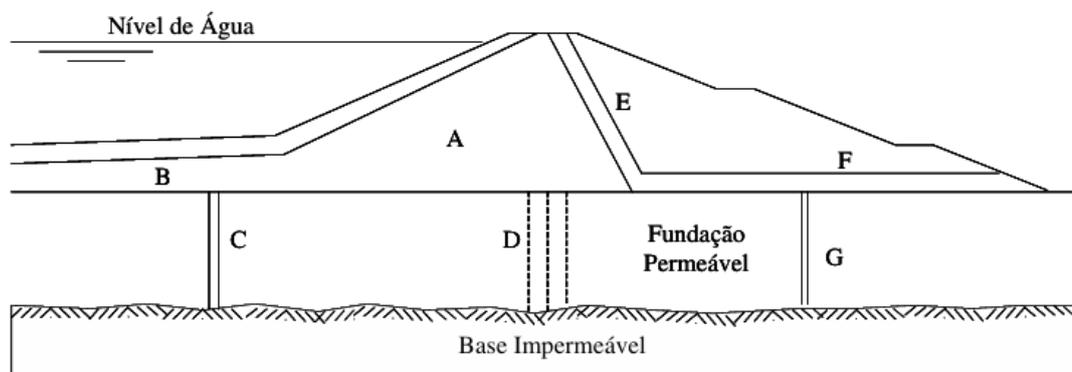


Fonte: Das e Sobhan (2014).

### 2.4.3. Métodos de controle da percolação

Massad (2010) ressalta que, de modo geral, o tratamento das fundações de barragens visa principalmente controlar a percolação, já que propriedades como capacidade de suporte e compressibilidade são de difícil melhoria. Nesse contexto, existem duas categorias principais de métodos para controlar a percolação em solos. A primeira engloba as técnicas destinadas à redução da percolação, como a utilização de uma zona impermeável, a instalação de um tapete impermeável a montante, o uso de um diafragma flexível ou uma zona de injeções. Já a segunda reúne os métodos voltados ao controle da drenagem, como o filtro-dreno vertical, o tapete drenante e os poços de alívio. A Figura 12 apresenta os métodos mais empregados no controle da percolação em solos permeáveis (ASSIS *et al.*, 2003).

Figura 12 – Métodos para o controle da percolação.



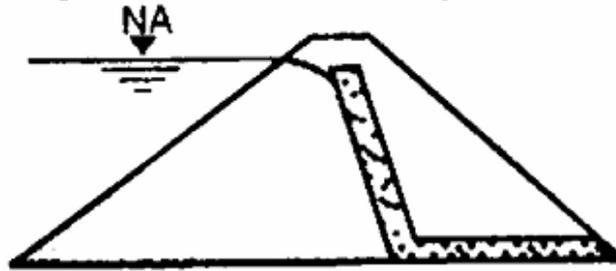
Fonte: ASSIS *et al.* (2003). (A) zona impermeável; (B) tapete impermeável a montante; (C) diafragma flexível; (D) zona de injeções; (E) filtro-dreno vertical; (F) tapete drenante; (G) poços de alívio.

A escolha do sistema de drenagem em uma barragem depende da permeabilidade do maciço e da fundação, bem como das características do material drenante disponível. Os filtros são empregados para impedir que partículas finas migrem para o material mais grosso, obstruindo o fluxo de água. Segundo Silva (2016), o sistema de drenagem interna de uma barragem pode incluir dreno vertical ou inclinado; dreno horizontal; dreno de saída ou de pé; trincheira drenante na fundação das ombreiras; furos de drenagem e poços de alívio na fundação.

De acordo com a Eletrobrás (2003), em barragens de terra de seções homogêneas, o sistema de drenagem interna será constituído por filtros verticais ou inclinados e sub-horizontais conjugados, além de drenos de pé. O topo do filtro, seja ele vertical ou inclinado, deve coincidir com a cota do nível d'água máximo *maximorum* do reservatório, garantindo o desempenho adequado do sistema.

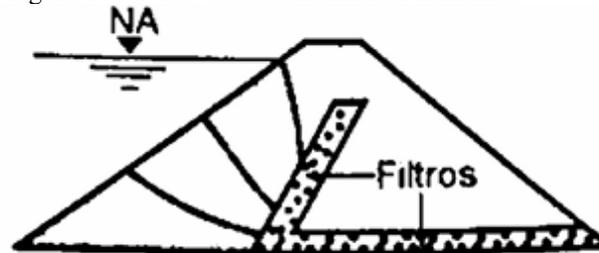
Massad (2010) destaca que, em barragens com fundações permeáveis, é mais vantajoso posicionar o filtro inclinado em direção à jusante, como mostrado na Figura 13, devido ao maior caminho de percolação da água. Em contrapartida, ao inclinar o filtro para montante, como mostra a Figura 14, observa-se uma melhora nas condições de estabilidade do talude de montante durante o rebaixamento rápido do nível do reservatório.

Figura 13 – Filtro vertical inclinado à jusante.



Fonte: MASSAD (2010).

Figura 14 – Filtro vertical inclinado à montante.



Fonte: MASSAD (2010).

## 2.5. REBAIXAMENTO RÁPIDO

A condição de rebaixamento rápido caracteriza-se pela necessidade de redução acelerada do nível d'água do reservatório, seja por razões operacionais ou em situações de emergência.

Esse fenômeno pode ocorrer devido à elevação do nível de água provocada por uma cheia, que permanece alto por determinado período. Quando o nível da cheia recua, essa redução costuma acontecer de forma relativamente rápida. O impacto dessa variação no nível de água do reservatório sobre uma barragem de aterro é fundamental para a compreensão do esvaziamento rápido. É necessário considerar não apenas a resistência do solo, mas também o comportamento das pressões intersticiais, avaliando se estas se dissipam ou permanecem em seu interior (Kerkes e Fasset, 2006).

Segundo Sousa (2021), essa situação de operação pode ser ocasionada por abertura de vertedouro, abertura das comportas de fundo, liberação da passagem da água pelos dutos de adução, casa de turbinas ou mesmo por um dique de sacrifício. É fundamental que os métodos

utilizados para promover o rebaixamento do reservatório dessa forma sejam previamente definidos em projeto.

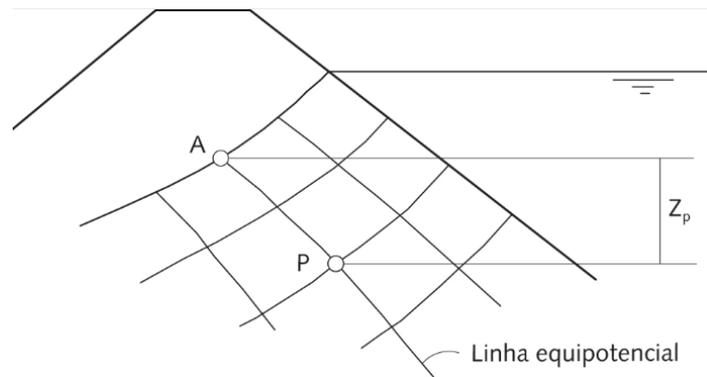
O rebaixamento de um reservatório em barragens convencionais, inicialmente em regime de fluxo permanente, é considerado “rápido” quando ocorre a uma velocidade superior à capacidade do maciço de dissipar as poropressões existentes. A redução do nível d'água diminui as tensões totais no talude de montante e provoca alterações nas poropressões, cujos valores variam de acordo com o comportamento mecânico do material do maciço. Como essas poropressões não se ajustam imediatamente à nova condição de contorno, marcada pela ausência da carga hidráulica do reservatório, inicia-se um regime de fluxo transiente até que um novo equilíbrio seja alcançado (Alonso e Pinyol, 2009).

Segundo ANA (2016), é necessário estabelecer diretrizes operacionais para o rebaixamento rápido do reservatório em situações de comprometimento da integridade da barragem. Esses procedimentos devem incluir precauções relacionados à velocidade de rebaixamento, a qual depende da capacidade de descarga existente, com o objetivo de prevenir danos às estruturas, sobretudo no caso de barragens de terra ou terra-enrocamento.

A condição de rebaixamento rápido representa um cenário crítico para o talude de montante de uma barragem. Essa situação ocorre quando, após uma redução abrupta do nível do reservatório, as poropressões permanecem elevadas, como nas condições normais de operação, resultando em uma diminuição da carga estabilizadora sobre o talude. A simulação do rebaixamento pode ser realizada de duas formas principais: a primeira considera a variação do nível do reservatório desde a cota máxima de operação até a cota mínima operacional; a segunda considera a redução até o nível mais baixo possível do reservatório. A estabilidade do talude estará garantida sempre que os fatores de segurança obtidos nas análises forem iguais ou superiores aos valores de referência estabelecidos com base em estudos de casos reais (MEIRELLES, 2014).

Nesse contexto, segundo Sandroni (2006), a estabilidade do talude de montante durante o rebaixamento está diretamente relacionada às poropressões presentes no maciço argiloso após a redução do nível d'água. Essas poropressões podem ser estimadas, inicialmente, a partir dos valores existentes antes do rebaixamento, obtidos por meio da rede de fluxo em regime permanente, conforme ilustrado na Figura 15 e indicado na primeira equação, acrescentando-se, de forma algébrica, a variação de poropressão ( $\Delta U$ ) provocada pelo rebaixamento, representada na Figura 15 na segunda equação.

Figura 15 – Poropressões teóricas durante rebaixamento rápido.



Antes do rebaixamento (tempo = 0<sup>-</sup>)

$$h_A^T = h_P^T \text{ (carga total)}$$

$$h_A^e + h_A^p = h_P^e + h_P^p$$

Mas  $h_A^p = 0$  (atmosférica)

$$\text{Então, } h_P^p = h_A^e - h_P^e = Z_p = \frac{U_P^{0-}}{\gamma_w}$$

$$\Rightarrow U_P^{0-} = Z_p \cdot \gamma_w \text{ [1]}$$

Após o rebaixamento (tempo = 0<sup>+</sup>)

$$U_P^{0+} = Z_p \cdot \gamma_w + \Delta U \text{ [2]}$$

Fonte: SANDRONI (2006).

Segundo Berilgen (2007), o rebaixamento é classificado como rápido se a dissipação da água nos solos que constituem a barragem de aterro não acompanhar a descida do nível de água da albufera. Portanto, não é a velocidade do rebaixamento que leva a que este seja considerado rápido ou lento, mas sim o fato de a dissipação das pressões intersticiais no maciço acompanharem, ou não, a descida do nível de água da albufera.

Viratjandr e Michalowski (2006) destacam que, o momento de maior instabilidade pode ocorrer para níveis de água mais elevados quanto mais lento for o rebaixamento. Portanto, se duas situações de rebaixamento ocorrerem com velocidades diferentes, no caso mais rápido, o fator de segurança mínimo poderá ser verificado para um nível do reservatório mais baixo que para uma velocidade mais lenta.

Nesse contexto, a principal questão a ser avaliada é se o comportamento dos materiais será drenado ou não drenado, para que sejam atribuídos parâmetros adequados na análise de estabilidade da estrutura. Se os materiais apresentarem alta permeabilidade e baixa compressibilidade, os excessos de poropressão gerados tendem a se dissipar rapidamente, caracterizando um comportamento drenado. Por outro lado, se a permeabilidade for baixa e a compressibilidade elevada, a dissipação dessas pressões será lenta, resultando em um comportamento praticamente não drenado. Nessa condição, há risco de ruptura do talude de

montante, pois, com o reservatório rebaixado, a água, que antes exercia uma força estabilizante, deixa de atuar sobre o talude saturado (AZEVEDO *et al.*, 2020).

Segundo Sousa (2016), a estabilidade de um barramento também é influenciada por sua geometria. Os materiais que compõem o talude estão sujeitos à ação da gravidade e, se as tensões aplicadas excederem a resistência ao cisalhamento do solo, pode ocorrer instabilidade. Aumentos na inclinação do talude elevam essas tensões, tornando a estrutura mais vulnerável a deslizamentos. Dessa forma, taludes mais inclinados tendem a apresentar menor estabilidade.

### 2.5.1. Resistência durante o rebaixamento

Durante o rebaixamento rápido de reservatórios, a estabilidade do talude a montante da barragem pode ser significativamente comprometida devido à redução da resistência do solo. Essa perda de resistência está diretamente relacionada ao aumento das poropressões, que permanecem elevadas no interior do maciço, uma vez que a dissipação da água nos poros não acompanha a velocidade de descida do nível do reservatório. Essa condição transitória reduz as tensões efetivas e, conseqüentemente, a resistência ao corte dos materiais, especialmente em solos de baixa permeabilidade (ALMEIDA, 2013; SOUSA, 2021).

Para as análises de estabilidade referentes à condição de rebaixamento rápido do reservatório, os parâmetros de resistência ao cisalhamento serão determinados por meio de ensaios adensados não drenados com amostras saturadas ( $R_{sat}$  ou  $CU_{sat}$ ), com medidas de pressões neutras. Esses ensaios poderão ser complementados ou substituídos, por ensaios adensados drenados saturados ( $S_{sat}$  ou  $CD_{sat}$ ) (ELETROBRÁS, 2003).

Nesse contexto, deve-se considerar além da resistência do solo, a dissipação ou não das poropressões que podem permanecer em seu interior. A presença de água é importante nesta análise, pois ela diminui a resistência do solo diminuindo a tensão efetiva como é mostrado na Equação 10.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (10)$$

Sendo:

$\sigma'$  = tensão normal efetiva;

$\sigma$  = tensão normal total;

$u$  = poropressão

Essa equação representa uma boa aproximação para solos saturados. No entanto, não é aplicável a solos não saturados, uma vez que, além da água, há a presença de ar nos poros, geralmente sob pressões distintas. Isso torna a análise mais complexa, devido à compressibilidade da fase gasosa e aos efeitos da tensão superficial da água, os quais resultam na sucção mátrica do solo (LEE *et al.*, 1983).

Dessa forma, para o caso de solo não saturado, Bishop (1955) propôs uma modificação na expressão da tensão efetiva, que pode ser representada pela Equação 11.

$$\sigma' = (\sigma - ua) + X (ua - uw) \quad (11)$$

Sendo:

$\sigma'$  = tensão efetiva;

$\sigma$  = tensão total;

$\chi$  = parâmetro relacionado com o grau de saturação;

$ua$  = pressão do ar;

$uw$  = pressão da água.

Essa equação representa uma extensão da clássica equação de Terzaghi ( $\sigma' = \sigma - u$ ) para situações em que o solo não está completamente saturado, ou seja, quando existe ar e água simultaneamente nos poros. Ela reconhece que, em solos não saturados, não apenas a pressão da água afeta a resistência. Além disso, inclui a sucção matricial como uma força que aumenta a coesão aparente. O fator  $\chi$  regula quanto da sucção realmente contribui para aumentar a resistência do solo (MACHADO e VILAR, 1998 apud SOUZA, 2016).

Estudos como os de Almeida (2013) e Sousa (2021) indicam que o fator de segurança (FS) tende a atingir valores mínimos não ao final, mas durante etapas intermediárias do rebaixamento, quando o desequilíbrio entre a perda da força estabilizadora externa e o excesso de poropressão interna é mais acentuado.

### 2.5.2. Caso de ruptura durante o rebaixamento rápido

Quando o nível d'água do reservatório diminui, perde-se a influência estabilizadora da pressão da água sobre o talude. A estabilidade do talude torna-se dependente das poropressões no maciço após o rebaixamento, as quais, conforme mencionado anteriormente, podem ser

estimadas pela soma da poropressão existente antes do rebaixamento com a variação provocada pela diminuição do nível d'água (SANDRONI, 2006).

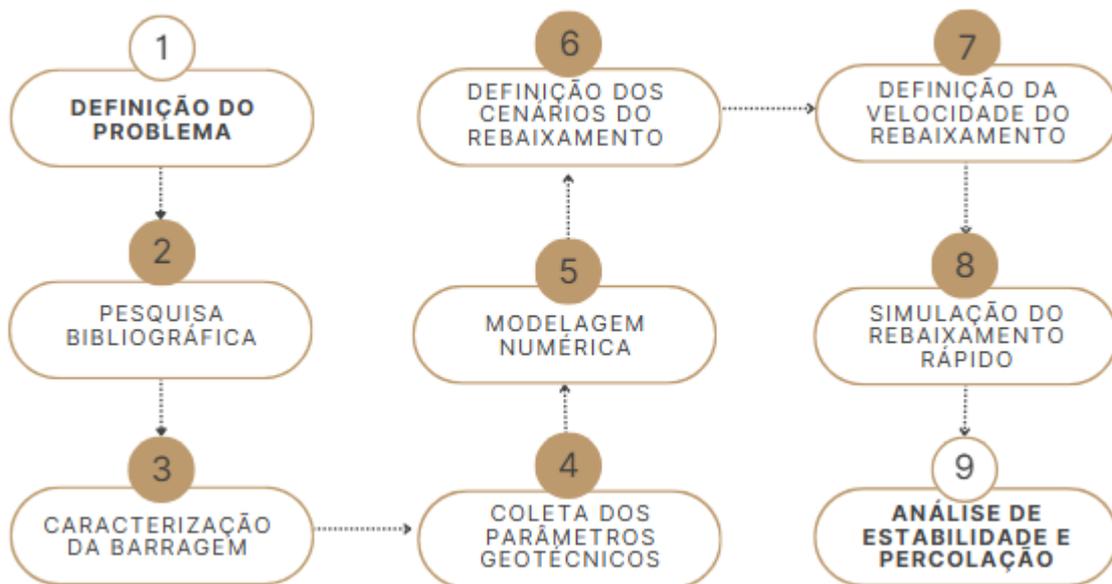
Em seu estudo, Sherard (1953 apud SANDRONI, 2006) identificou que rupturas de barragens durante o rebaixamento rápido ocorreram, em geral, quando o nível do reservatório variou entre o nível máximo e a metade da altura da estrutura. Esses incidentes estiveram ligados a rebaixamentos mais rápidos ou de maior amplitude já experimentados pelo barramento. O autor ressalta que tais escorregamentos não costumam ser superficiais, mas sim profundos, frequentemente associados a fundações com baixa resistência.

No Brasil, um caso de deslizamento superficial no talude durante rebaixamento rápido ocorreu na barragem de Banabuiú (CE). Nesse evento, a camada superficial de *riprap* deslizou em uma área onde a compactação do solo sob o *riprap*, próxima à face externa do maciço, foi insuficiente. Embora não tenha representado risco imediato de desastre, escorregamentos no talude de montante geralmente acarretam custos elevados, atrasos e graves transtornos para a operação da estrutura (SANDRONI, 2006).

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho constitui um estudo de caso e tem como objetivo simular o rebaixamento rápido de uma barragem em dois cenários distintos, a fim de avaliar o fator de segurança em cada um deles. Para isso, são coletados dados construtivos da barragem, parâmetros geotécnicos de resistência e permeabilidade. Posteriormente, procede-se à modelagem numérica, nas quais são definidas as condições de contorno, os parâmetros do modelo e as hipóteses adotadas para a simulação do rebaixamento rápido. A Figura 16 apresenta um fluxograma com as etapas metodológicas deste estudo.

Figura 16 – Fluxograma da metodologia.

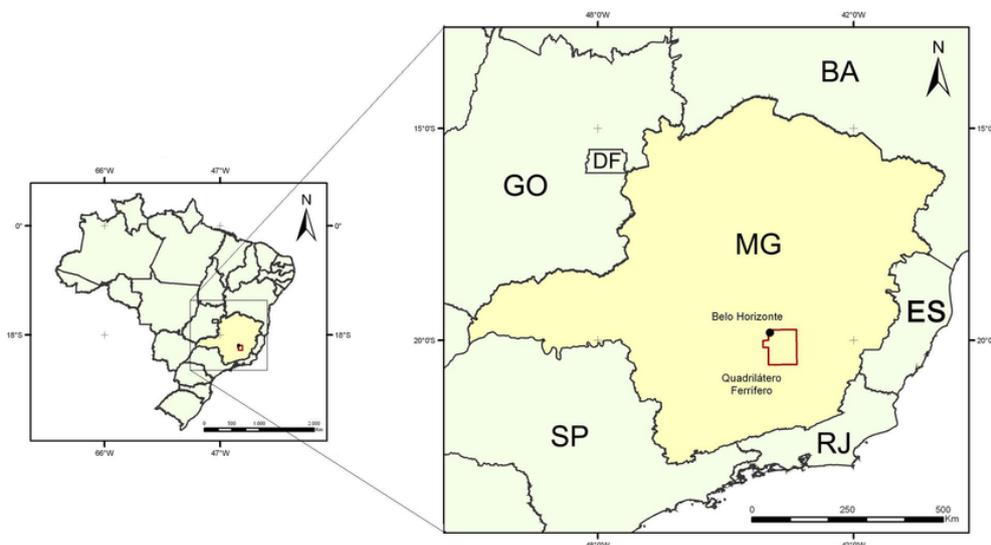


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.1. GEOMETRIA DA BARRAGEM

O estudo de caso é feito em uma barragem de água situada em uma área de mineração, localizada na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, região reconhecida pela intensa atividade mineradora. A Figura 17 apresenta o mapa de localização da região do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 17 – Localização do Quadrilátero Ferrífero.



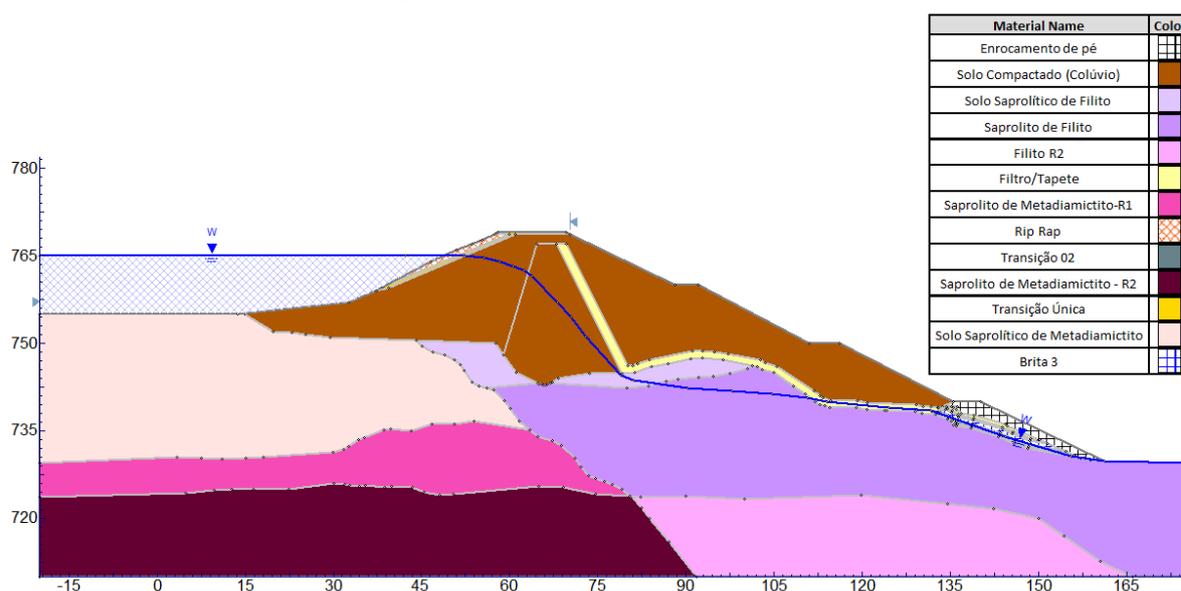
Fonte: Ruchkys U.A (2007).

A finalidade da barragem em estudo é o armazenamento de água. A estrutura apresenta altura de 48 m, inclinação do talude de jusante de 2,0 H: 1,0 V, crista na elevação El. 770,0 m com 315,0 m de comprimento e 7,5 m de largura. O sistema de extravasor da barragem é composto por uma galeria com tomada d'água e dois emboques em comportas, por uma galeria próxima a ombreira direita e por um canal rápido com trechos em degraus e bacia de dissipação.

O sistema de drenagem interna é do tipo chaminé, constituído por um filtro de areia inclinado, e por um tapete drenante horizontal, sendo esse lançado diretamente na fundação de jusante após o tratamento da mesma. Para monitoramento do fluxo de água proveniente do interior do maciço, foi implantado um septo argiloso com a finalidade de dividir o fluxo devido às condições topográficas e geológicas. A jusante do dreno de pé central da barragem foi implantada canaletas coletoras e medidores de vazões para cada região de monitoramento.

A barragem é constituída de um núcleo de solo argiloso e apresenta duas seções típicas, sendo uma homogênea, ou seja, formada somente de solo argiloso (colúvio), enquanto a outra apresenta blocos com finos no espaldar de montante e solo compactado no espaldar de jusante. A seção transversal analisada nesse estudo corresponde a seção homogênea, chamada de 1-1', sendo escolhida por apresentar a máxima altura da barragem. A Figura 18 apresenta essa seção.

Figura 18 – Seção 1-1' analisada no estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2. INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação existente na barragem referente ao plano de monitoramento da estrutura é composta pelos instrumentos mostrados na Tabela 2. A seção 1-1' possui 03 piezômetros acústicos (PA) e 04 piezômetros abertos tipo Casagrande (PI), conforme indicado na Figura 19.

Tabela 2 – Instrumentação da barragem em estudo.

Instrumento	Quantidade
Piezômetros Casagrande	30
Piezômetros acústicos	21
Indicadores de nível de água (INA's)	9
Marcos de deslocamento superficial	18
Inclinômetros	7
Medidores de vazão	7
Medidor do nível do reservatório	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio dos piezômetros, é possível determinar a pressão da água em um determinado ponto no interior do maciço. Os piezômetros de tubo aberto medem a poropressão através da altura da coluna de água que se estabiliza dentro do tubo, enquanto os piezômetros de corda

vibrante quantificam a pressão por meio da deformação de um diafragma, captada por um sensor de fio vibrante. Com base nessas leituras, é possível realizar a calibração da rede de fluxo do modelo.

### 3.3. PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

A partir de investigações geotécnicas, ensaios e amostragens realizadas nos materiais da barragem e fundação, os quais não estão disponíveis para apresentação neste trabalho, foram obtidos os parâmetros geotécnicos de resistência e permeabilidade, conforme apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3 – Parâmetros geotécnicos de resistência.

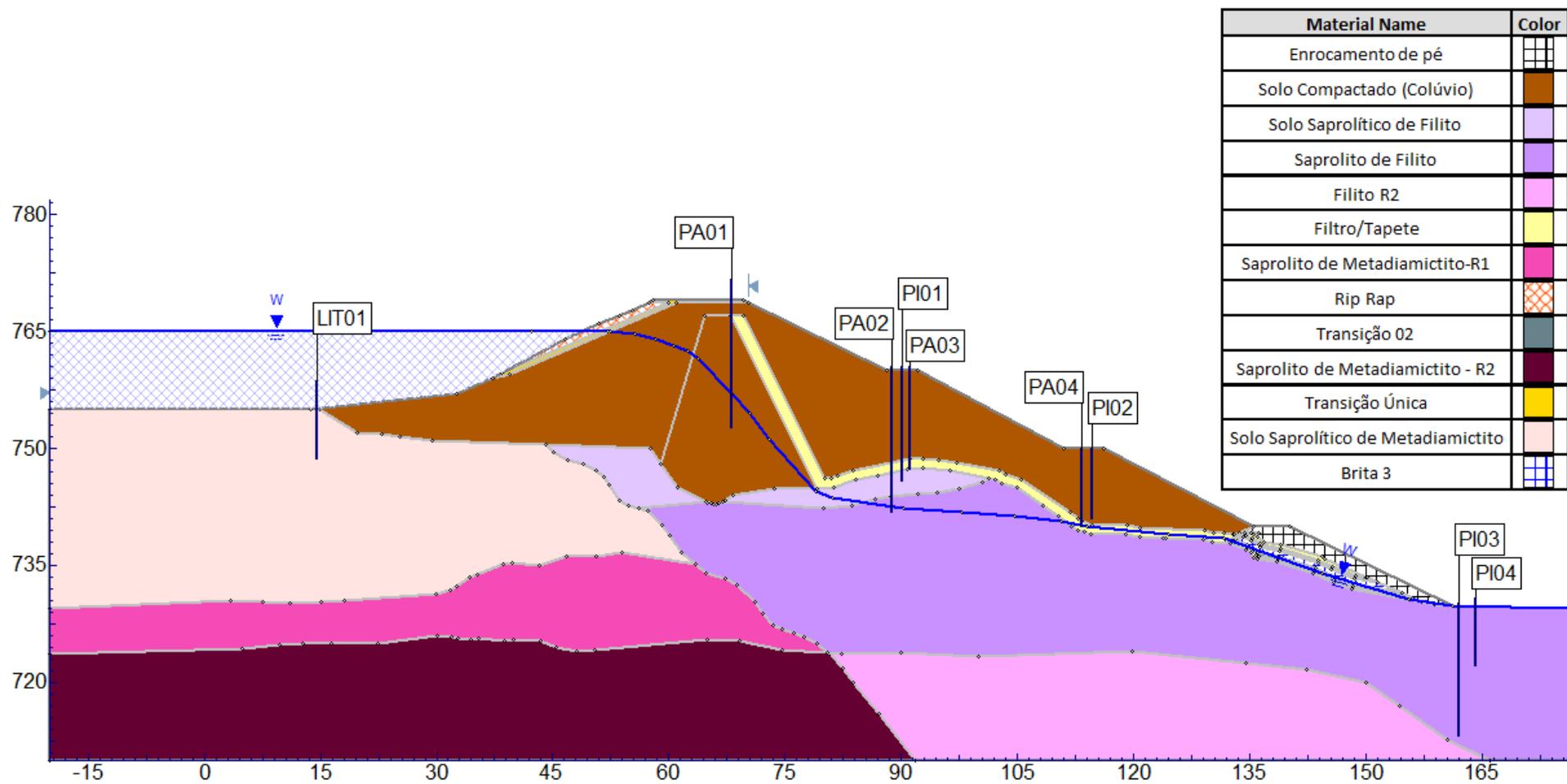
<b>Material</b>	<b>Peso específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Tipo de resistência</b>	<b>Coesão (kPa)</b>	<b>φ (°)</b>
Enrocamento de pé	21	Mohr-Coulomb	0	40
Solo Compactado (Colúvio)	19	Mohr-Coulomb	32	29
Solo Saprolítico de Filito	19	Mohr-Coulomb	42	16
Saprolito de Filito	19	Mohr-Coulomb	68	25
Filito R2	21	Mohr-Coulomb	70	32
Filtro/Tapete	20	Mohr-Coulomb	0	30
Saprolito de Metadiamicitito - R1	19	Mohr-Coulomb	68	25
Rip Rap	25	Mohr-Coulomb	0	40
Transição 02	20	Mohr-Coulomb	0	35
Saprolito de Metadiamicitito - R2	21	Mohr-Coulomb	70	32
Transição Única	20	Mohr-Coulomb	0	35
Solo Saprolítico de Metadiamicitito	19	Mohr-Coulomb	39	20
Brita 3	20	Mohr-Coulomb	0	35

Nota:

$\gamma$  – Peso específico do solo (kN/m<sup>3</sup>); c – Coesão (kPa);  $\phi$  – Ângulo de atrito interno (°)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Instrumentação da seção 1-1'



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Parâmetros de permeabilidade.

<b>Material</b>	<b>Modelo</b>	<b>KS (m/s)</b>	<b>K2/K1</b>
Enrocamento de pé	Simples	0,45	1
Solo Compactado (Colúvio)	Simples	4e-07	0,2
Solo Saprolítico de Filito	Simples	1e-05	1
Saprolito de Filito	Simples	2e-06	1
Filito R2	Simples	4e-07	1
Filtro/Tapete	Simples	0,001	1
Saprolito de Metadiamicrito - R1	Simples	2e-06	1
Rip Rap	Simples	1	1
Transição 02	Simples	0,05	1
Saprolito de Metadiamicrito - R2	Simples	4e-07	1
Transição Única	Simples	0,001	1
Solo Saprolítico de Metadiamicrito	Simples	1e-05	1
Brita 3	Simples	0,25	1

Nota: KS – Condutividade hidráulica saturada (m/s); K2/K1 – Relação entre a condutividade hidráulica horizontal e vertical (adimensional)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo compactado foi considerado anisotrópico, com um coeficiente de permeabilidade na direção horizontal equivalente a cinco vezes o valor na direção vertical, devido ao efeito de compactação. Os demais materiais foram assumidos como isotrópicos.

Nesse contexto, os parâmetros geotécnicos obtidos por meio dos ensaios foram inseridos no software para a realização das simulações. Os parâmetros de permeabilidade foram utilizados na análise de fluxo.

### 3.4. ESTUDO DO REBAIXAMENTO DO RESERVATÓRIO

Após a conclusão das etapas preliminares, que incluíram a caracterização detalhada da barragem, a definição das condições de contorno, e a avaliação dos parâmetros de resistência e permeabilidade dos materiais constituintes da estrutura, deu-se início aos estudos de rebaixamento do reservatório.

Para conduzir essas análises, foram realizadas simulações transientes de fluxo. Utilizou-se o software de elementos finitos desenvolvido pela empresa Rocscience, o Slide2. Dentre os vários métodos determinísticos de equilíbrio-limite implementados neste software, foram empregadas preferencialmente soluções rigorosas que permitem executar análises atendendo a todas as condições de equilíbrio. Dessa forma, utilizaram-se os métodos de Morgenstern-Price, Spencer e Sarma.

Na primeira simulação realizada, o principal objetivo foi analisar os fatores de segurança da barragem sob a condição de rebaixamento do nível do reservatório à taxa de um metro por

dia. Esse levantamento é fundamental para avaliar se, diante de um eventual cenário de rebaixamento rápido, a estrutura atende aos fatores de segurança mínimos exigidos para a estabilidade do talude de montante, conforme os critérios estabelecidos pela norma NBR 13028 (ABNT, 2024), demonstrados na Tabela 1.

Para a barragem em estudo, foi realizada inicialmente uma análise de percolação em regime permanente, condição na qual o fluxo permanece constante ao longo do tempo, com o objetivo de calibrar a rede de fluxo com base nos níveis piezométricos lidos em campo. Na sequência, procedeu-se à análise transiente, que considera a variação temporal dessas condições, simulando o rebaixamento gradual do nível do reservatório. Essa etapa foi subdividida em 13 estágios e teve como finalidade avaliar como a linha freática se comporta à medida que o nível do reservatório é rebaixado, conforme indicado na Tabela 5.

O rebaixamento foi simulado ao longo dos 10 primeiros dias, sendo o Estágio 0 correspondente ao nível estático inicial. Considerando que o objetivo do estudo é avaliar a estabilidade do talude, optou-se por realizar análises após 100, 200 e 300 dias, a fim de observar a evolução do fator de segurança a longo prazo.

Tabela 5 – Dados inseridos na análise de fluxo transiente.

<b>Estágio</b>	<b>Tempo (dias)</b>	<b>Nível (m)</b>
0	0	765
1	1	764
2	2	763
3	3	762
4	4	761
5	5	760
6	6	759
7	7	758
8	8	757
9	9	756
10	10	755
11	100	755
12	200	755
13	300	755

Fonte: Elaborado pelo autor.

O processo de rebaixamento ocorrerá da cota de operação do reservatório, que é de 765 metros, até a cota mínima de 755 metros. Isso representa uma redução total de 10 metros no nível da água, indicando um ritmo médio de rebaixamento de 1 metro por dia. De acordo com

Pinyol *et al.* (2009), as taxas comuns de rebaixamento variam entre 0,1 e 1 m/dia; por esse motivo, adotou-se a taxa de 1 m/dia, por se tratar de uma escolha mais conservadora, e possibilitar a avaliação do talude em uma situação mais instável. A partir do 10º dia, o nível do reservatório permanece constante na cota de 755 metros, sendo então analisado o comportamento da estrutura após 100, 200 e 300 dias.

Na segunda simulação, foi considerada uma situação hipotética de esvaziamento do reservatório em apenas um dia, com o objetivo de analisar o comportamento da estrutura diante de um cenário crítico. Nessa condição, o nível do reservatório foi rebaixado 10 metros ao longo de 24 horas. Esse tipo de simulação visa representar uma condição emergencial, como a necessidade de esvaziamento rápido devido a riscos de instabilidade ou falhas operacionais.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

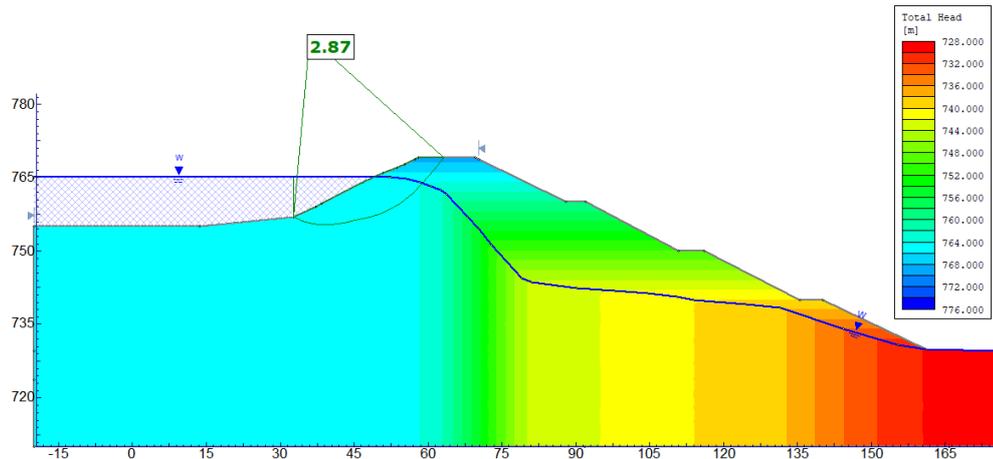
Nesta seção são apresentados os resultados do estudo de caso, que teve como foco a avaliação dos fatores de segurança do talude de montante de uma barragem de água submetida à condição de rebaixamento rápido. O objetivo principal foi avaliar a resposta do talude frente a diferentes cenários de variação do nível do reservatório. No primeiro cenário, considerou-se o rebaixamento à taxa de 1 metro por dia. No segundo, foi analisada a situação em que o rebaixamento ocorre em apenas 24 horas. Por fim, investigou-se a taxa máxima de rebaixamento que mantém o fator de segurança dentro do limite mínimo estabelecido pela norma ( $FS \geq 1,1$ ).

### 4.1. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE FÍSICA PARA REBAIXAMENTO GRADUAL

Inicialmente, elaborou-se uma análise de percolação, considerando-se regime de fluxo permanente. Na Figura 20, pode-se observar como o fluxo se desenvolve na barragem em um cenário habitual, as cargas totais ao longo da seção e o resultado do fator de segurança nessa condição. Conforme mencionado anteriormente, foram utilizados três métodos de equilíbrio limite nas análises. Contudo, os resultados apresentados neste capítulo adotam como referência o método de Morgenstern-Price, por ter sido aquele que apresentou o menor fator de segurança.

A análise do fator de segurança determinístico do talude de montante indica que o barramento atende os requisitos de norma, uma vez que o valor obtido supera 2,5, atendendo o requisito mínimo de 1,5 estabelecido pela legislação vigente nessa condição, conforme apresentado na Tabela 1.

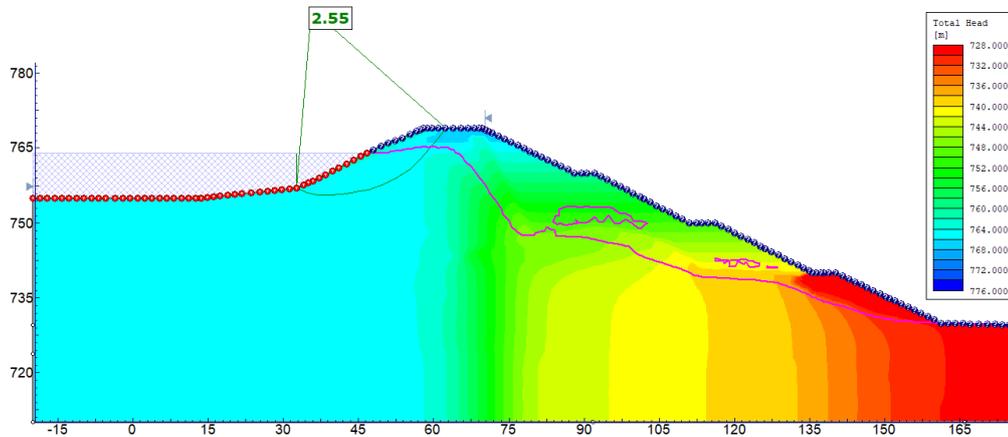
Figura 20 – Análise do talude de montante na condição habitual da barragem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

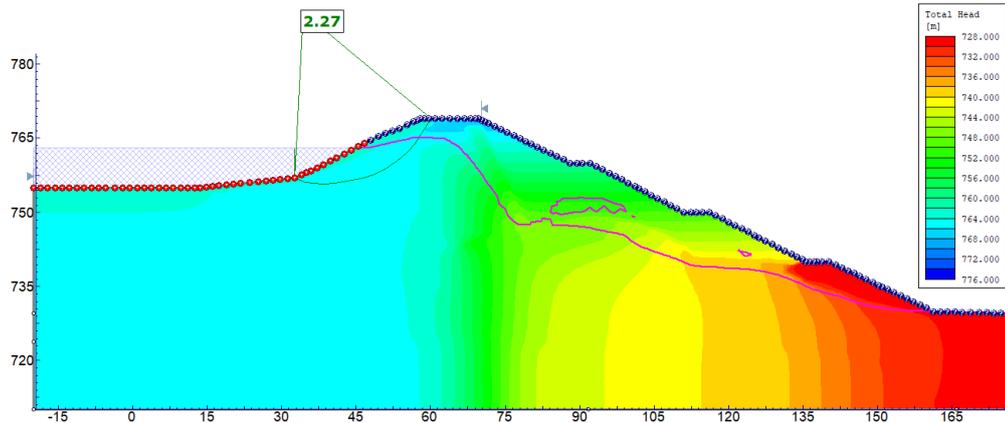
Em seguida, foram realizadas as análises de fluxo transiente, considerando os parâmetros de permeabilidade previamente apresentados neste trabalho. As Figuras 21 a 33 apresentam os resultados dessas análises para cada estágio considerado.

Figura 21 – Rebaixamento no estágio 1.



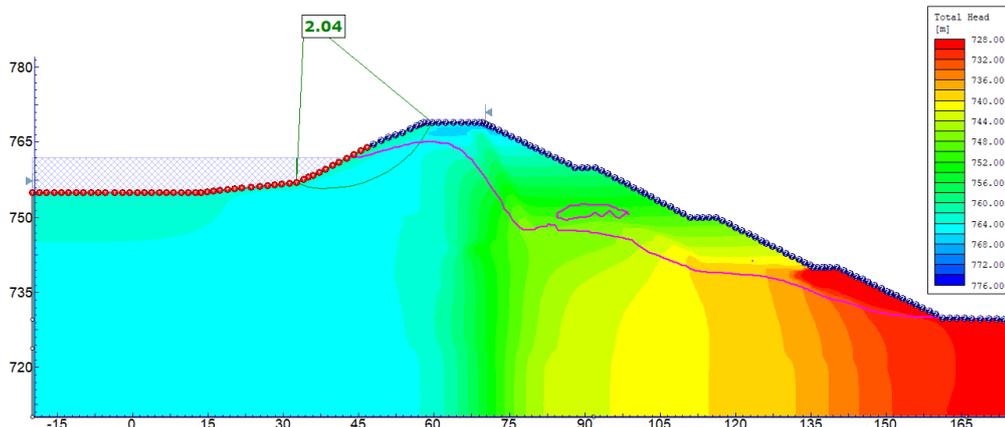
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Rebaixamento no estágio 2.



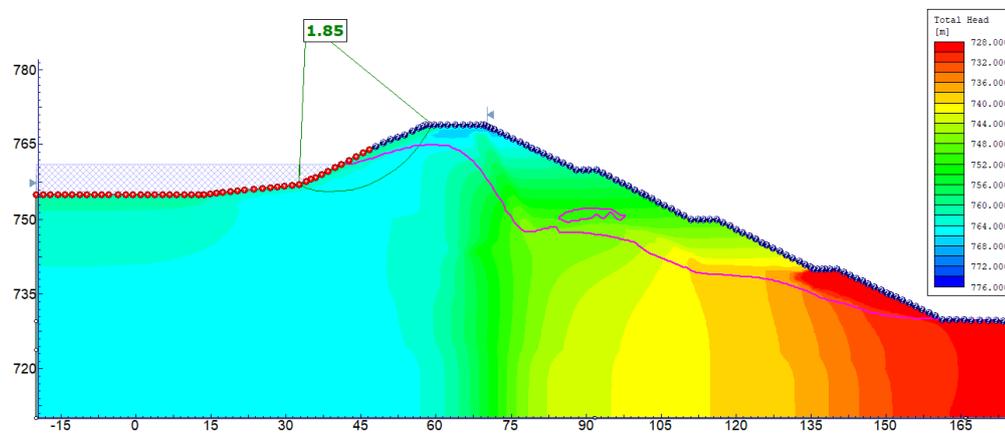
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Rebaixamento no estágio 3.



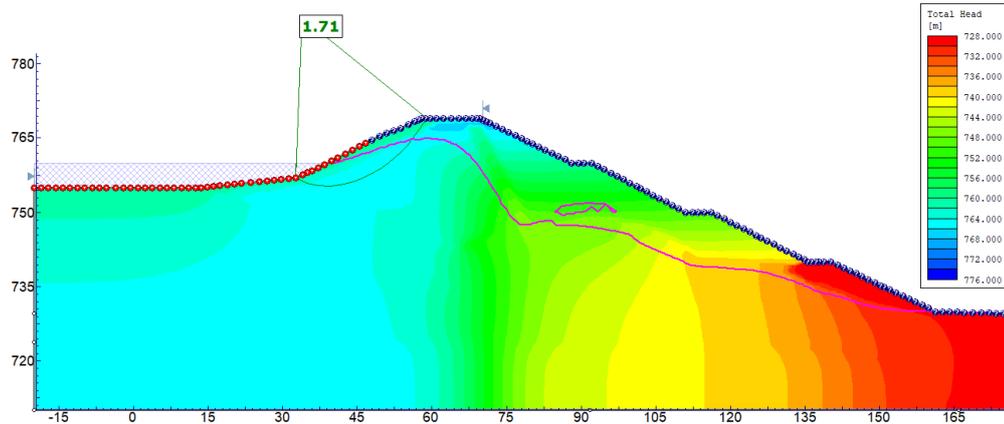
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Rebaixamento no estágio 4.



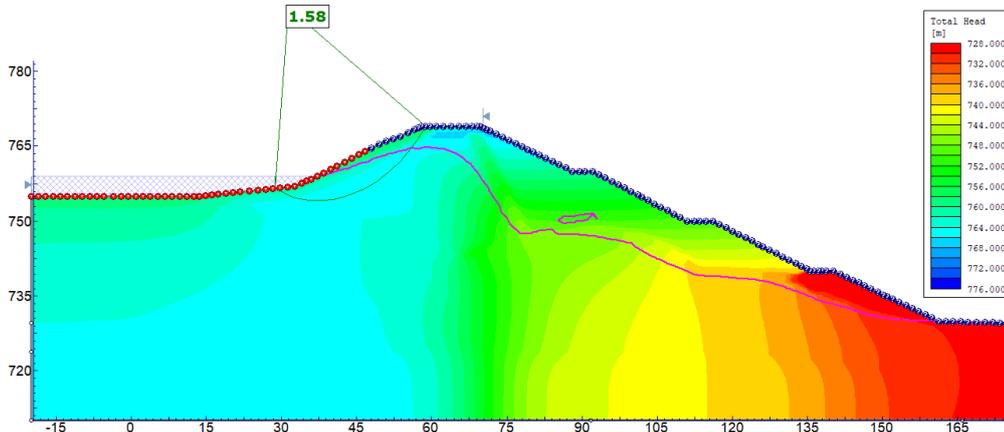
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Rebaixamento no estágio 5.



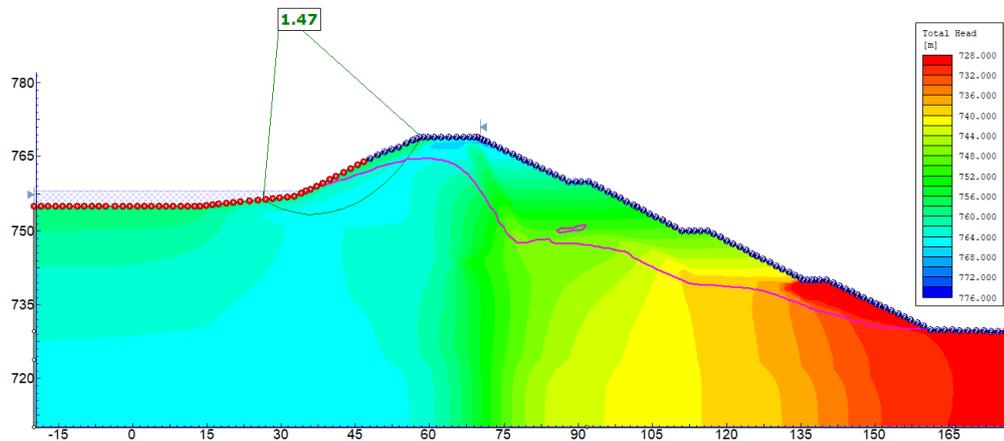
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Rebaixamento no estágio 6.



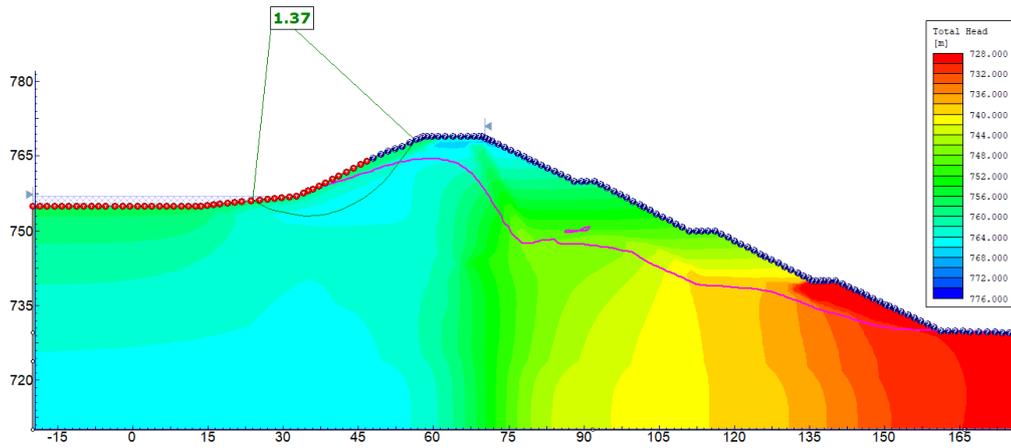
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Rebaixamento no estágio 7.



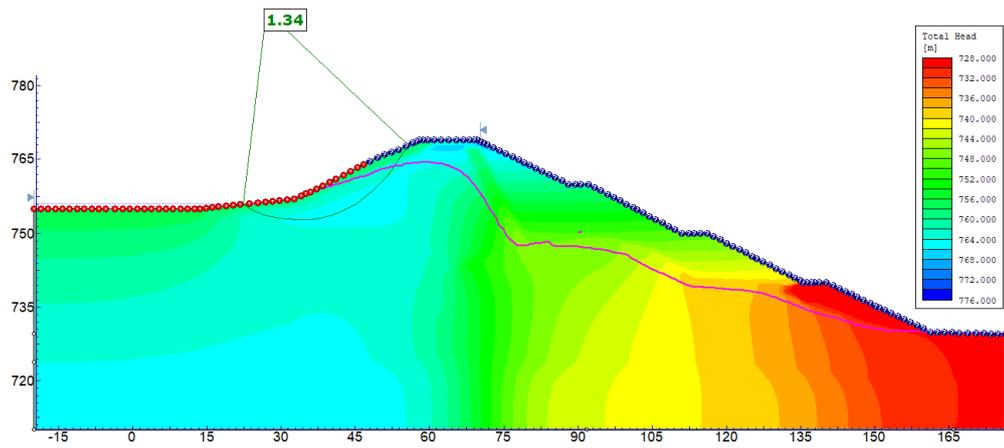
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 – Rebaixamento no estágio 8.



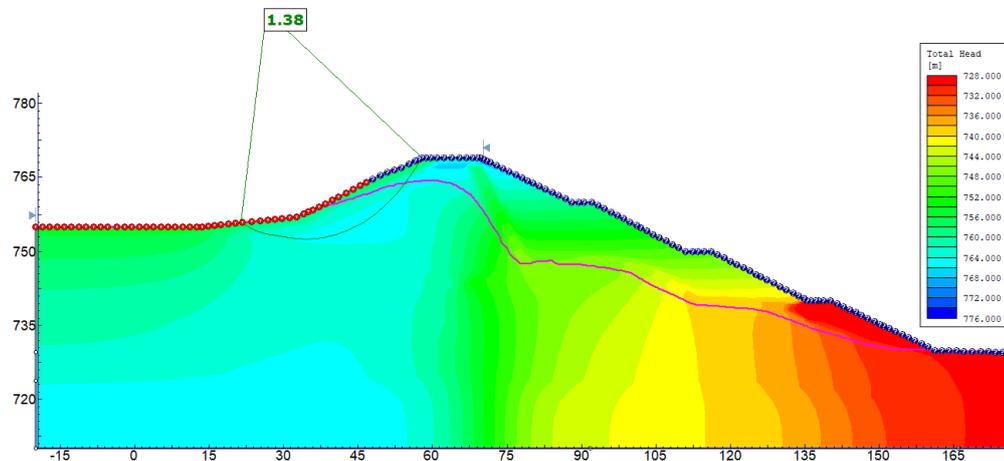
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Rebaixamento no estágio 9.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Rebaixamento no estágio 10.

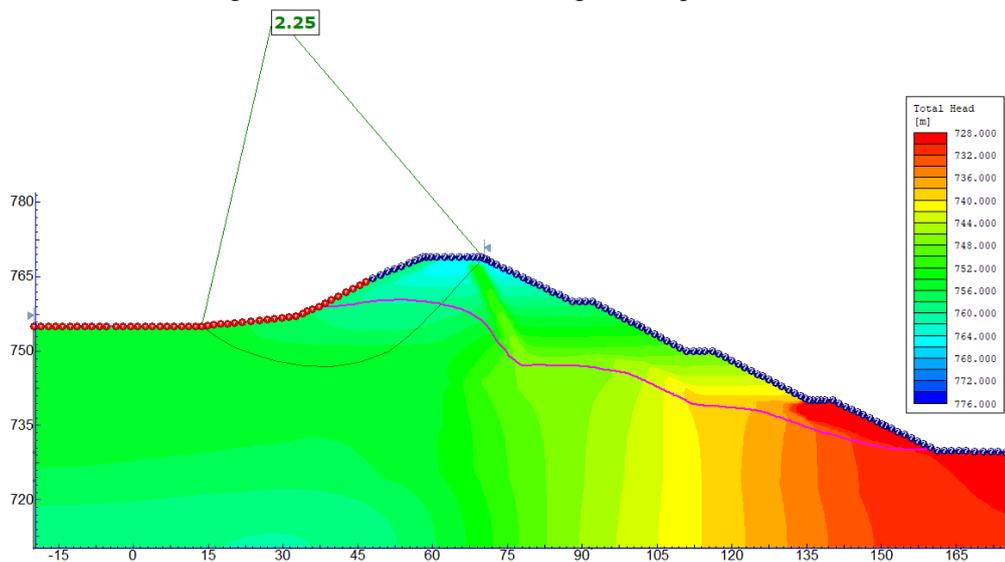


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos resultados apresentados nas Figura 21 a Figura 30 observa-se que a linha piezométrica no núcleo do barramento não acompanha a mesma velocidade de rebaixamento do nível do reservatório. Isso ocorre devido à baixa permeabilidade do maciço, o que resulta em uma dissipação lenta das poropressões ao longo do tempo e consequentemente, uma redução dos fatores de segurança.

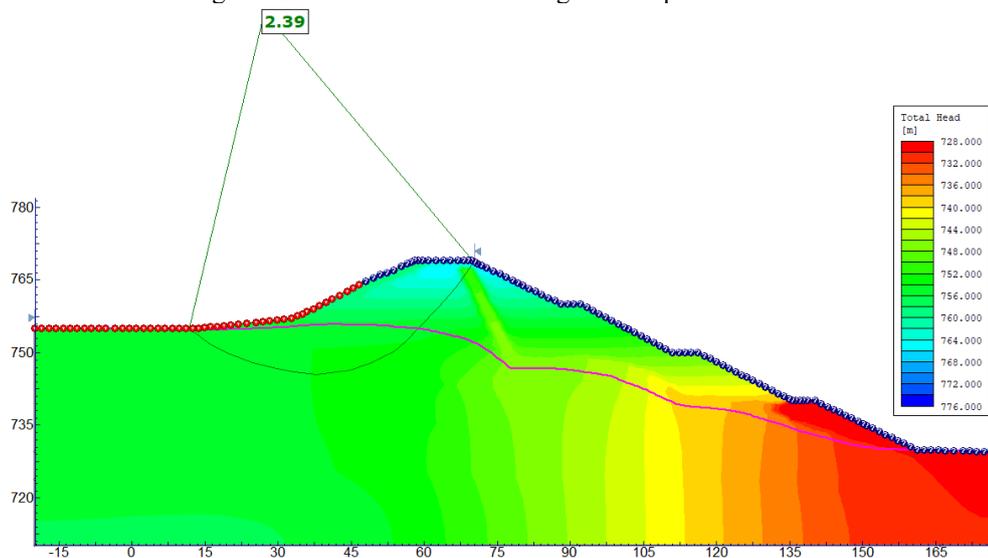
As Figuras 31 a 33 ilustram a evolução do fator de segurança a longo prazo.

Figura 31 – Rebaixamento no estágio 11 – após 100 dias.



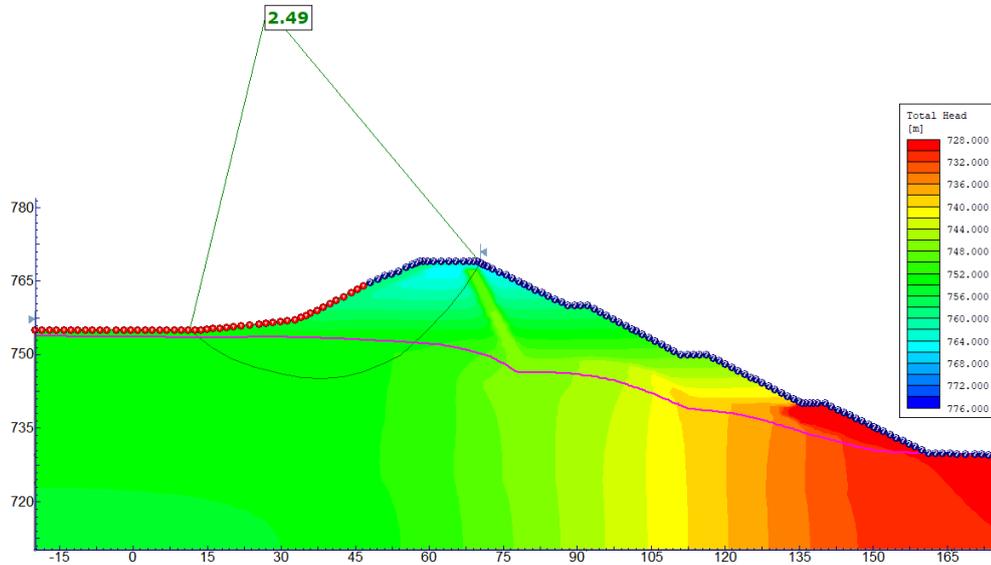
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Rebaixamento no estágio 12 – após 200 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Rebaixamento no estágio 13 – após 300 dias.



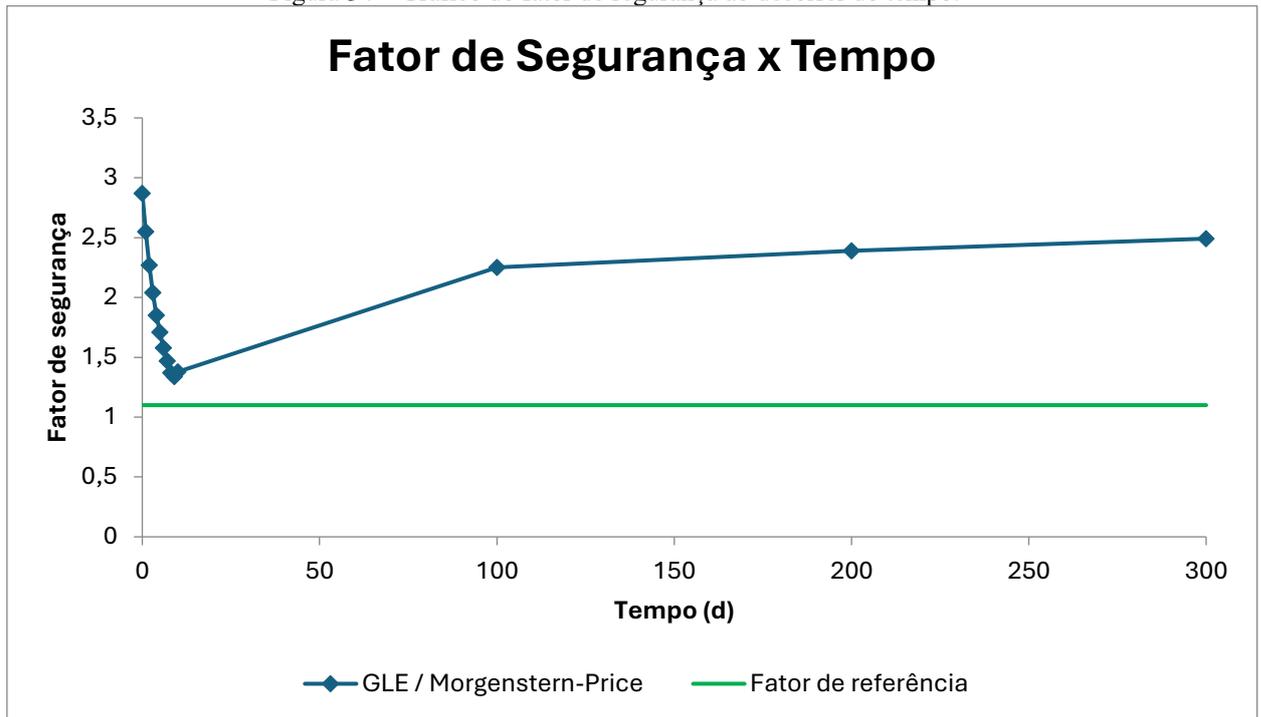
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que, com o decorrer dos dias, ocorre a dissipação gradual das poropressões no interior do maciço, o que contribui para a recuperação do fator de segurança, aproximando-o dos valores obtidos na condição habitual de operação da barragem. No Estágio 13, correspondente à análise realizada após 300 dias, foi obtido um fator de segurança de 2,49, em comparação ao valor de 2,87 verificado na condição habitual. É provável que esse valor continue a se elevar caso a análise seja estendida para prazos mais longos. Entretanto, não se pode afirmar que esse fator de segurança chegue ao valor encontrado na condição normal de operação da barragem.

Nesse contexto, verifica-se que, em todos os estágios analisados, os fatores de segurança obtidos foram superiores a 1,10, valor mínimo recomendado pela norma ABNT NBR13028 (2024) para a condição de rebaixamento rápido. Todavia, observa-se uma diminuição gradual do fator de segurança com o passar dos dias, devido ao fato das poropressões não se ajustarem imediatamente à nova condição de contorno e permanecerem elevadas, resultando em uma diminuição da carga estabilizadora sobre o talude.

A Figura 34 apresenta o gráfico do fator de segurança em função do tempo, abrangendo desde o cenário habitual da barragem (tempo zero) até o final da simulação, aos 300 dias. O gráfico permite visualizar de forma mais clara a redução gradual desse parâmetro ao longo do tempo, além de evidenciar que os valores obtidos permanecem acima do limite mínimo estabelecido pela norma.

Figura 34 – Gráfico do fator de segurança ao decorrer do tempo.

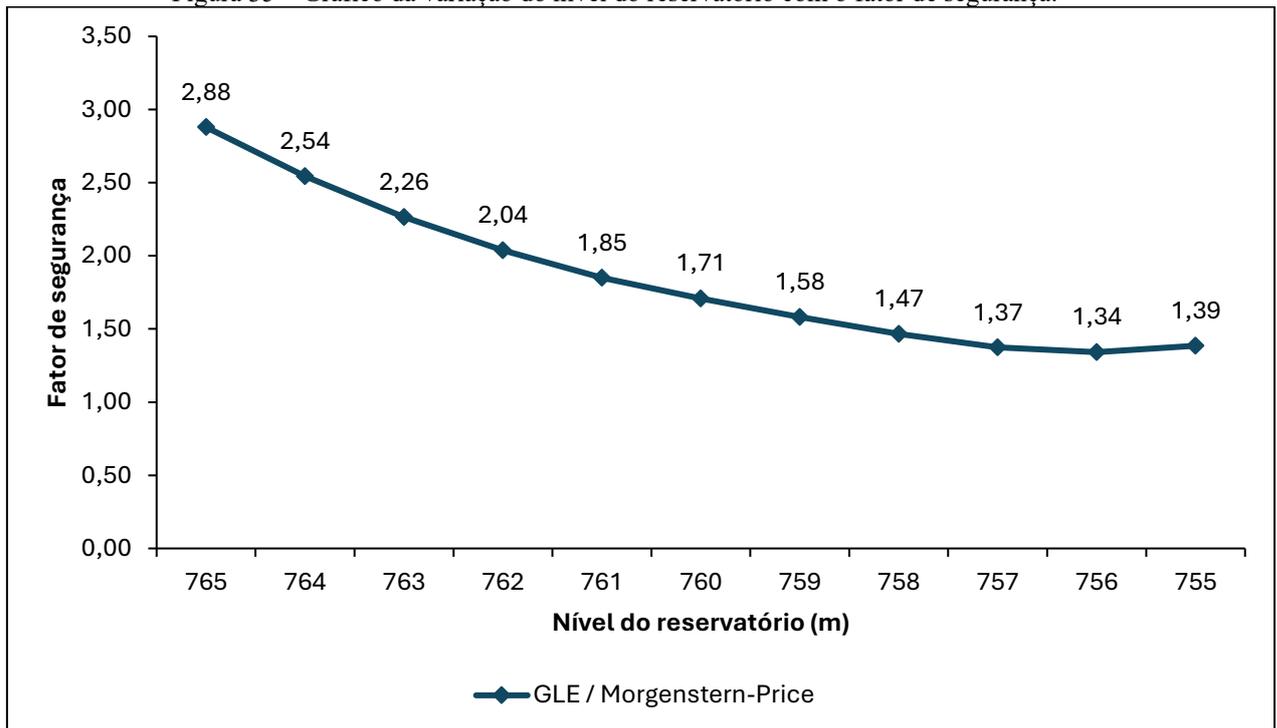


Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico mostra que, até o estágio 10, equivalente a 10 dias após o início do rebaixamento, os fatores de segurança apresentaram uma tendência contínua de redução. A partir do estágio 11, o cenário do rebaixamento rápido foi analisado a longo prazo e observa-se que o fator de segurança foi aumentando com o tempo. Isso ocorre porque à medida que o fluxo através da barragem preenche os vazios do solo, as poropressões começam a se dissipar gradualmente. Esse processo resulta em uma recuperação do fator de segurança, evidenciando uma melhora nas condições de estabilidade da estrutura ao longo do tempo. Destaca-se que, no estágio 13, correspondente a 300 dias após o rebaixamento, o fator de segurança atinge o valor mais próximo daquele observado em situação habitual de estabilidade da estrutura.

Com o objetivo de proporcionar uma melhor visualização do comportamento da barragem, elaborou-se um gráfico relacionando o fator de segurança ao nível do reservatório, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Gráfico da variação do nível do reservatório com o fator de segurança.



Fonte: Elaborado pelo autor.

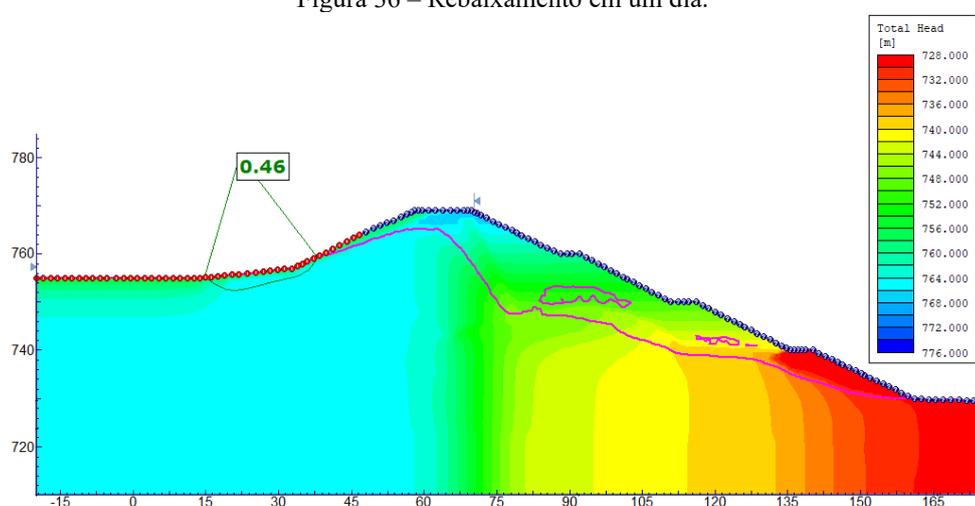
Verifica-se que o fator de segurança do talude de montante apresenta uma relação diretamente proporcional ao nível do reservatório, de modo que a redução desse nível resulta também na diminuição do fator de segurança. Assim, o esperado era que o menor fator de segurança ocorresse no momento em que o reservatório da barragem estivesse completamente esvaziado. No entanto, conforme as análises realizadas, pode-se observar que isso não ocorreu. O menor valor foi registrado no estágio 9, correspondente ao nono dia após o início do rebaixamento, com um fator de segurança de 1,34. Já no estágio 10, quando o reservatório foi totalmente esvaziado, o fator de segurança foi de 1,38. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que, no estágio 10, existe uma poropressão negativa (sucção matricial), que ocorre no pé do talude devido ao nível do reservatório estar mais baixo, o que contribui para o aumento da tensão efetiva e, conseqüentemente, para o aumento do fator de segurança.

Nesse contexto, estudos como o de Rodrigues e Lobo (2023) demonstraram que o menor valor do fator de segurança ocorreu no mesmo dia em que foi registrado o menor nível do reservatório. Eles ressaltam que a magnitude dessa variação é dependente da elevação: para níveis mais altos do reservatório, a queda no FS é mais acentuada; já em níveis mais baixos, a variação do FS ocorre de forma menos significativa.

## 4.2. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE FÍSICA PARA REBAIXAMENTO EM UM DIA

A Figura 36 apresenta o resultado da análise de estabilidade para a condição hipotética de esvaziamento do reservatório em 24 horas. Verifica-se que o fator de segurança obtido está significativamente abaixo do valor mínimo exigido pela legislação, indicando a ocorrência de ruptura no talude de montante nesse cenário.

Figura 36 – Rebaixamento em um dia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar os resultados obtidos nas duas simulações, observa-se uma diferença significativa nos valores do fator de segurança. Na primeira simulação, em que o rebaixamento do reservatório ocorreu de forma gradual ao longo de 10 dias, o fator de segurança final foi de 1,38. Já na segunda simulação, com rebaixamento instantâneo em um único dia, o fator de segurança caiu para 0,46.

Essa diferença se deve ao fato de que, no cenário com rebaixamento em um dia, a ação estabilizadora exercida pela lâmina d'água do reservatório é perdida de forma imediata, sem que haja tempo suficiente para a dissipação das poropressões. Por outro lado, no rebaixamento gradual, a perda da força estabilizadora ocorre de maneira progressiva, permitindo que as poropressões se dissipem ao longo do tempo. No entanto, é importante destacar que, em condições reais de operação, o rebaixamento tende a ocorrer de forma gradual.

Nesse contexto, resultados semelhantes foram observados por Sousa (2016). Em seu estudo, o objetivo foi comparar as análises considerando o rebaixamento do nível do

reservatório de forma gradual e imediata. Da mesma forma, os resultados indicaram que, quando o rebaixamento é tratado como imediato, o fator de segurança é reduzido, pois não considera a dissipação das poropressões e assume a perda instantânea da força estabilizadora exercida pela lâmina d'água do reservatório contrária ao movimento de deslizamento do talude. Por outro lado, ao adotar uma abordagem mais realista com rebaixamento gradual, observa-se que o fator de segurança inicia em um valor mais elevado e diminui progressivamente até que o nível do reservatório atinja sua cota mínima, geralmente definida pela tomada d'água. Isso ocorre porque tanto a dissipação das poropressões quanto a perda da força estabilizadora da água acontecem de forma gradual.

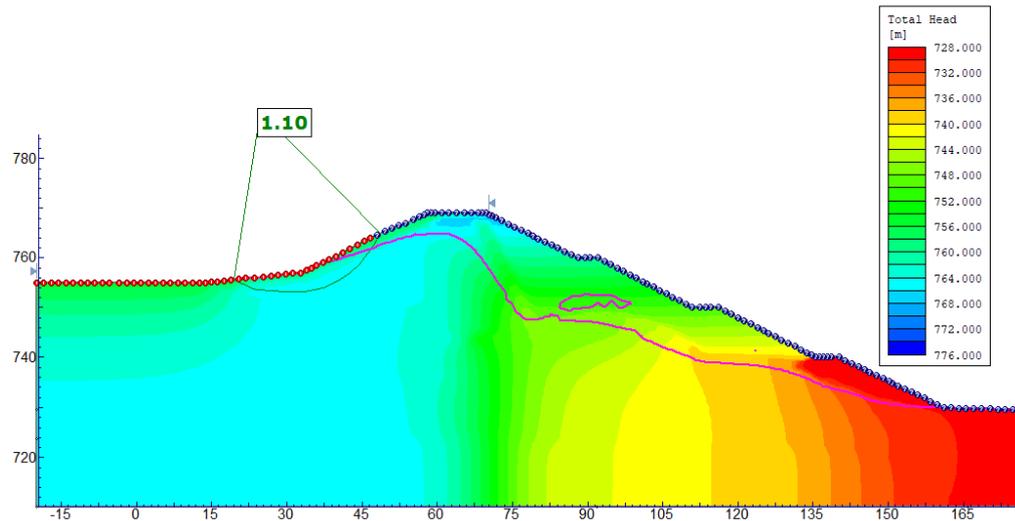
#### 4.3. VERIFICAÇÃO DA TAXA DE REBAIXAMENTO PARA CONDIÇÃO LIMITE DE ESTABILIDADE

A partir dos resultados do rebaixamento gradual, verificou-se que os fatores de segurança permaneceram em conformidade com os valores mínimos exigidos pela norma para essa condição. Por outro lado, quando considerado o rebaixamento em apenas um dia, o fator de segurança apresentou valor significativamente inferior ao limite normativo.

Diante desse resultado, tornou-se necessário identificar a taxa máxima admissível para o rebaixamento rápido, de modo que o fator de segurança permanecesse em conformidade com o limite mínimo de segurança exigido pela norma, correspondente a 1,1 para esse cenário. Para isso, foi conduzida uma análise paramétrica, na qual diferentes taxas de rebaixamento foram testadas, até que se identificasse o valor crítico correspondente ao limite de estabilidade estabelecido.

Nas simulações realizadas foram consideradas taxas de rebaixamento de 2 m/dia, 5 m/dia e 3,33 m/dia. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a taxa de 3,33 m/dia representa o valor crítico máximo que mantém o fator de segurança dentro do limite estabelecido pela norma. Considerando que o reservatório possui altura de 10 m, o rebaixamento completo ocorreu em 3 dias. O resultado obtido pode ser visualizado na Figura 37.

Figura 37 – Rebaixamento em 3 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa análise evidencia a importância de um planejamento para o rebaixamento rápido do nível do reservatório, uma vez que taxas excessivas podem comprometer a segurança da estrutura. Além disso, os resultados reforçam que decisões operacionais estejam sempre alinhadas com critérios de segurança e normas técnicas vigentes.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento de uma barragem de água frente à condição de rebaixamento rápido do nível do reservatório, por meio de modelagem numérica utilizando o software Slide2. A partir da definição das características geométricas e geotécnicas da estrutura, foram realizadas simulações considerando diferentes cenários de rebaixamento, visando avaliar o fator de segurança em cada um deles. A metodologia adotada, baseada em simulações transientes calibradas por dados reais de instrumentação, permitiu avaliar a estabilidade da estrutura frente a essa condição.

Os resultados demonstraram que, na simulação do rebaixamento gradual, mesmo adotando uma taxa de rebaixamento de 1 metro por dia, a estrutura atende aos requisitos da norma, com valores de fatores de segurança acima do mínimo exigido pela norma técnica (NBR 13028:2024). Entretanto, nos primeiros dias da simulação, verificou-se uma redução gradual do fator de segurança, devido à lenta dissipação das poropressões, causada pela baixa permeabilidade do maciço. Observou-se também que, após o término do rebaixamento, o fator de segurança tende a se recuperar ao longo do tempo, devido à dissipação dessas poropressões.

No cenário hipotético de esvaziamento do reservatório em 24 horas, os resultados mostram que o fator de segurança foi significativamente inferior ao limite normativo, indicando o rompimento do talude de montante da barragem. Esse resultado evidencia que a perda instantânea da ação estabilizadora da lâmina d'água, sem o tempo necessário para dissipação das poropressões, pode comprometer a segurança da estrutura.

Neste estudo, identificou-se ainda a taxa crítica de rebaixamento associada ao fator de segurança mínimo exigido pela norma. Constatou-se que, para que o rebaixamento rápido do reservatório ocorra mantendo o fator de segurança em conformidade com o valor mínimo exigido, a taxa máxima admissível seria de 3,33 m/dia.

Dessa forma, a comparação entre os dois cenários demonstra que a taxa de rebaixamento do reservatório exerce influência direta sobre a estabilidade da estrutura. Assim, conclui-se que, em situações de operação ou emergência, a adoção de taxas de rebaixamento controladas é fundamental para garantir a integridade estrutural da estrutura. Além disso, reforça-se a importância de monitoramento contínuo por meio de instrumentação adequada, bem como da realização de estudos preventivos que considerem diferentes cenários de operação e emergência.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). *Diretrizes para a elaboração do plano de operação, manutenção e instrumentação de barragens: manual do empreendedor sobre segurança de barragens*. Vol. VII. Brasília: ANA, 2016. 135 p.

ALONSO, E.; PINYOL, N. Slope stability under rapid drawdown conditions. In: *First Italian Workshop on Landslides*, 2009.

ASSIS, A. P.; HERNANDEZ, H. M.; COLMANETTI, J. P. *Barragens: apostila G.AP-AA006/02*. Brasília, DF: Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13028:2024 — Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

AZEVEDO, F. D.; AZEVEDO, R. F.; FRANÇA, R. V. M. *Estudo conceitual de rebaixamento do reservatório de uma barragem de mineração para fins de descaracterização*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas. *Anais...* Campinas: ABMS, 2020

BERILGEN, M. M. *Investigation of stability of slopes under drawdown conditions*. Computers and Geotechnics, v. 34, p. 81–91, 2007.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 21 set. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Atualiza a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB e estabelece novas diretrizes para fiscalização e segurança de barragens. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 set. 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm). Acesso em: 30 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. *Manual de segurança e inspeção de barragens*. Brasília, 2002.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. *Mecânica dos solos*. São Carlos: EESC-USP, 1985. v. 2.

CBDB - Comitê Brasileiro De Barragens (2019). *As Barragens e a Água do Mundo: um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo*. Paris, França: CIGB-ICOLD.

CONCEIÇÃO, Geovanna Ferreira da. *Piping em barragens de rejeitos: um estudo comparativo entre modelagens numéricas em 2D e 3D*. 2025. 83 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2025.

COSTA, W. D. *Geologia de barragens*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, P. T. *100 barragens brasileiras*. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

D'HYPPOLITO, L. C. S.; SAYÃO, A. J.; NUNES, A. L. L. *A simple method for assessing the probability of liquefaction of tailings dams*. *Soils and Rocks*, v. 47, n. 4, e2024000924, 2024.

ELETROBRÁS. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 2003.

FABRÍCIO, J. V. F. *Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

FERNANDES, M. M. *Mecânica dos solos*. 2. ed. Porto: FEUP Edições, 2009.

FONSECA, Alessandra da Rocha. *Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para a geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão*. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPENCER, P. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 37, n. 5, 2000.

GEO-SLOPE International Ltd. SLOPE/W: stability analysis of earth structures [software]. Calgary, Canadá: Geo-Slope International Ltd., 2022.

GERSCOVICH, D. M. S. *Estabilidade de taludes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

LEITE, S. R. *Modelo para avaliação de riscos em segurança de barragens com associação de métodos de análise de decisão multicritério e conjuntos fuzzy*. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional em Computação Aplicada) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

LIMA, V. A. *Uso das técnicas HCT e TDR no monitoramento do processo de consolidação em reservatórios de barragem de rejeitos*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

LOZANO, F. A. E. *Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 965 p.

MACHADO, W. G. F. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MEIRELLES, F. S. C. Unidade 9: Barragens de terra e enrocamento. In: *Curso segurança de barragens: módulo I – Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais*. Brasília: ANA, 2014.

MURRIETA, P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

NAEINI, M.; AKHTARPOUR, A. *A numerical investigation on hydro-mechanical behaviour of a high centreline tailings dam*. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, v. 60, n. 3, p. 49–60, 2018.

NOVAIS BARBOSA, J. A. *Mecânica dos fluidos e hidráulica geral*. Porto: Porto Editora, 1985.

NOVAK, P.; MOFFAT, A. I. B.; NALLURI, C.; NARAYANAN, R. *Hydraulic Structures*. 4. ed. Oxon: Taylor & Francis, 2017.

OLIVEIRA, J. F. C. M. de. *Análise de estabilidade de taludes pelo método de Sarma*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2014.

PEREIRA, T. S. *Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

PIMENTA JUNIOR, I. *Caracterização geotécnica e análise de estabilidade de taludes de mineração em solos da Mina de Capão Xavier*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

PINTO, Carlos de Souza. *Curso básico de mecânica dos solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANDRONI, Sandro S. *Apostila para o Curso Básico sobre Projeto de Barragens de Terra e Enrocamento*. Mestrado em Geotecnia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

SANDRONI. *Apostila para o Curso Básico sobre Projeto de Barragens de Terra e Enrocamento* – Mestrado em Geotecnia. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

SANTOS, D. B. Estabilidade global transiente de taludes pelo método do equilíbrio limite sob infiltração de água em solo não saturado. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SEEUENT. *GeoStudio 2023 – SEEP/W User Manual: modeling seepage in porous media*. Christchurch, Nova Zelândia, 2023.

SHERARD, J. L. *et al.* *Earth and Earth Rock-Dams*. New York: John Wiley & Sons, 1953.

SILVA, D. L. da. *Estudo comparativo entre análises probabilísticas e determinísticas de estabilidade de talude de um depósito de resíduos de mineração*. 2019. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVEIRA, D. da. *Instrumentação e segurança de barragens*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2006.

SIMANGUNSONG, Ganda Marihot; PRASSETYO, Simon Heru; PINEM, Riadi Simka. Relationship between blasting operation and slope stability: a case study at Borneo Indo Bara open pit coal mine. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 14, n. 29890, p. 1-21, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81784-2>

SOARES, L. *Barragem de rejeitos*. In: LUZ, A. U.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Orgs.). *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. cap. 19, p. 831–888.

SOUSA, G. M.; GOMES, R. C. *Obtaining geotechnical parameters from correlations between geophysics and CPT tests in tailings dams*. *REM - International Engineering Journal*, v. 73, n. 4, p. 453–462, 2020.

SOUSA, T. F. P. de. *Abordagem Monte Carlo para a análise probabilística da estabilidade de taludes durante rebaixamento rápido de reservatório*. 2021. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SOUZA, Vinícius Manfrini Oliveira. *Aspectos fundamentais para a análise de estabilidade de taludes de barragens durante rebaixamento rápido*. 2016. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

TELLES, A. C. M. *Análise de estabilidade de um talude rompido na Rodovia RJ 130, Teresópolis, RJ*. 2015. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Slope stability*. Engineer Manual EM 1110 2-1902. Washington, DC, 2003.

VALLERO, D. A.; LETCHER, T. M. Engineering risks and failures: lessons learned from environmental disasters. *Leadership and Management in Engineering*, v. 12, n. 4, p. 199–209, 2012.

VICK, S. G. *Planning, design, and analysis of tailings dams*. Canada: BiTech Publishers Ltd., 1990. 369 p.

VIRATJANDR, Chardphoom; MICHALOWSKI, Radoslaw L. *Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown*. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 43, n. 8, p. 802–814, 2006.