

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

PEDRO HENRIQUE ZEUS SANTOS PEIXOTO MESQUITA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGEM DE TERRA
HOMOGÊNEA FICTÍCIA**

Ilha Solteira

2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PEDRO HENRIQUE ZEUS SANTOS PEIXOTO MESQUITA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGEM DE TERRA
HOMOGÊNEA FICTÍCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para obtenção
do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Breno Padovezi Rocha

Ilha Solteira

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

M582a Mesquita, Pedro Henrique Zeus Santos Peixoto.
Análise de estabilidade de taludes em barragem de terra homogênea fictícia / Pedro Henrique Zeus Santos Peixoto Mesquita. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
78 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil)
-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Breno Padovezi Rocha
Inclui bibliografia

1. Geotecnia computacional. 2. Erosão regressiva. 3. Modelagem numérica.
4. Segurança de barragens. 5. Equilíbrio limite. 6. Geostudio.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: PEDRO HENRIQUE ZEUS SANTOS PEIXOTO MESQUITA

Título: **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA FICTÍCIA**

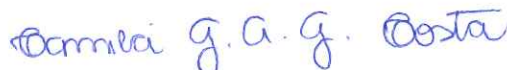
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Breno Padovezi Rocha

FEIS/UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)



Profª. Dra. Camila Gabriela Alexandre Geromel Costa

FEIS/UNESP – Campus de Ilha Solteira



Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima

FEIS/UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

15/12/2025

RESUMO

A segurança de barragens de terra depende intrinsecamente da interação entre o fluxo de água interno e a resistência ao cisalhamento do maciço terroso. O presente trabalho teve como objetivo analisar a estabilidade de taludes de uma barragem homogênea de terra, avaliando diferentes cenários operacionais e a eficácia do sistema de drenagem interna. A metodologia empregada consistiu na modelagem numérica computacional utilizando o software GeoStudio 2018 R2, integrando análises de percolação pelo Método dos Elementos Finitos (módulo SEEP/W) e análises de estabilidade pelo Método de Equilíbrio Limite (módulo SLOPE/W), adotando o método rigoroso de Morgenstern-Price. Foram simuladas condições de nível máximo normal, cheia de projeto, rebaixamento rápido e lento do reservatório, além de um cenário de falha por colmatção do sistema de drenagem. Os resultados demonstraram que o talude de montante apresenta desempenho satisfatório, com Fator de Segurança (FS) de 1,65 mesmo sob a condição crítica de rebaixamento rápido. Em contrapartida, o talude de jusante em operação normal apresentou um FS de 1,47, situando-se marginalmente abaixo do critério mínimo de 1,50 recomendado pelas normas vigentes (NBR 13.028 e USACE), configurando um estado de alerta que demanda intervenções como a execução de bermas de equilíbrio. Adicionalmente, a simulação de inoperância do filtro revelou o fenômeno de surgência da linha freática no talude de jusante, evidenciando que a drenagem é vital não apenas para a estabilidade de massa, mas para a prevenção de erosão regressiva (*piping*). Conclui-se que a modelagem numérica é uma ferramenta indispensável para o diagnóstico de riscos ocultos em barragens, permitindo a proposição de medidas de segurança assertivas.

Palavras-chave: Geotecnia computacional. Erosão regressiva. Modelagem numérica. Segurança de barragens. Equilíbrio limite. GeoStudio.

ABSTRACT

The safety of earth dams depends intrinsically on the interaction between internal water flow and the shear strength of the soil mass. This study aimed to analyze the slope stability of a homogeneous earth dam by evaluating different operational scenarios and the effectiveness of the internal drainage system. The methodology employed consisted of computational numerical modeling using GeoStudio 2018 R2 software, integrating seepage analyses via the Finite Element Method (SEEP/W module) and stability analyses via the Limit Equilibrium Method (SLOPE/W module), adopting the rigorous Morgenstern-Price method. Conditions of normal maximum water level, design flood, rapid and slow reservoir drawdown were simulated, in addition to a failure scenario due to clogging of the drainage system. Results showed that the upstream slope presents satisfactory performance, with a Factor of Safety (FS) of 1.65 even under the critical condition of rapid drawdown. Conversely, the downstream slope under normal operation presented an FS of 1.47, situated marginally below the minimum criterion of 1.50 recommended by current standards (NBR 13.028 and USACE), constituting an alert state that demands interventions such as the execution of stabilizing berms. Additionally, the simulation of filter inoperability revealed the phenomenon of phreatic line daylighting on the downstream slope, evidencing that drainage is vital not only for mass stability but also for the prevention of backward erosion (piping). It is concluded that numerical modeling is an indispensable tool for diagnosing hidden risks in dams, enabling the proposal of assertive safety measures.

Keywords: *Computational geotechnics. Backward erosion. Numerical modeling. Dam safety. Limit equilibrium. GeoStudio.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL E NO MUNDO	8
1.2. IMPORTÂNCIA DA ESTABILIDADE DE TALUDES PARA A SEGURANÇA DE BARRAGENS	10
1.3. SINISTROS HISTÓRICOS DE BARRAGENS E SUAS CONSEQUÊNCIAS	11
1.4. DELIMITAÇÃO DO ESCOPO E ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVO GERAL	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. TIPOS DE BARRAGENS DE TERRA E SUAS GEOMETRIAS TÍPICAS	17
3.2. MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL DA SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL	21
3.3. NORMAS TÉCNICAS E DIRETRIZES APLICÁVEIS À ESTABILIDADE DE TALUDES	23
3.4. BOAS PRÁTICAS DE ENGENHARIA EM PROJETO, CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E MONITORAMENTO	25
3.4.1. Instrumentação de auscultação aplicada à avaliação da estabilidade de taludes	28
3.5. PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS UTILIZADOS EM BARRAGENS DE TERRA	30
3.6. FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DOS SOLOS E DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE	32
3.7. MÉTODOS DE ANÁLISE E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	35
3.7.1. Métodos de equilíbrio limite	37

3.7.2. Métodos numéricos e visão geral do GeoStudio (SEEP/W e SLOPE/W).....	39
3.8. FATORES DE SEGURANÇA E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO	42
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA FICTÍCIA	44
4.1.1. Geometria e condições de contorno	45
4.1.2. Parâmetros geotécnicos adotados	46
4.2. CONFIGURAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS NO GEOSTUDIO	47
4.2.1. Modelagem do regime de percolação no SEEP/W	49
4.2.2. Modelagem da estabilidade de taludes no SLOPE/W	50
4.3. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE	51
4.3.1. Condições de nível d'água (normal, máximo operacional, maximorum).....	53
4.3.2. Condições de rebaixamento lento e rápido.....	54
4.3.3. Configurações com e sem filtro de drenagem	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1. RESULTADOS DE ESTABILIDADE DE TALUDES	58
5.1.1. Talude de montante.....	58
5.1.2. Talude de jusante.....	64
5.1.3. Análise comparativa dos cenários de nível d'água e rebaixamento.....	68
5.2. COMPARAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA COM CRITÉRIOS DE NORMAS E LITERATURA	69
5.3. ANÁLISE DA EFICÁCIA DO FILTRO DE DRENAGEM NA ESTABILIDADE GLOBAL	69
5.4. POSSÍVEIS MODIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS OU DE PROJETO PARA AUMENTO DE SEGURANÇA	70
6. CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seção típica de uma barragem.	18
Figura 2: Seção típica de barragem com diafragma impermeável.	19
Figura 3: Estabilidade do talude de montante: rebaixamento rápido com filtro (10d).....	59
Figura 4: Estabilidade do talude de montante: rebaixamento lento com filtro (180 d).	59
Figura 5: Estabilidade do talude de montante: nível máximo normal com filtro.	60
Figura 6: Estabilidade do talude de montante: rebaixamento rápido sem filtro (10d).	60
Figura 7: Estabilidade do talude de montante: rebaixamento lento sem filtro (180d).	61
Figura 8: Estabilidade do talude de montante: nível máximo normal sem filtro.	61
Figura 9: Estabilidade do talude de montante com berma: rebaixamento rápido com filtro (10d).	62
Figura 10: Estabilidade do talude de montante com berma: rebaixamento lento com filtro (180d).	63
Figura 11: Estabilidade do talude de montante com berma: nível máximo normal com filtro.	64
Figura 12: Estabilidade do talude de jusante: nível máximo normal com filtro.....	65
Figura 13: Estabilidade do talude de jusante: nível máximo <i>maximorum</i> com filtro.....	66
Figura 14: Estabilidade do talude de jusante: nível máximo normal sem filtro.	66
Figura 15: Estabilidade do talude de jusante: nível máximo <i>maximorum</i> sem filtro.	67
Figura 16: Estabilidade do talude de jusante com berma: nível máximo normal com filtro.....	67
Figura 17: Estabilidade do talude de jusante com berma: nível máximo <i>maximorum</i> com filtro.	68

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL E NO MUNDO

A construção de barragens é reconhecida como uma das infraestruturas mais relevantes para o desenvolvimento socioeconômico, garantindo usos múltiplos da água, geração de energia, controle de cheias, abastecimento urbano, irrigação e outros serviços essenciais. Estudos recentes destacam que barragens podem ser construídas com diferentes materiais, técnicas e dimensões, frequentemente armazenando grandes volumes de água ou rejeitos e, portanto, grandes quantidades de energia potencial, o que torna a segurança dessas estruturas um tema central da gestão de riscos hídricos e de desastres. (Silva; Mattos; Silva, 2023).

No contexto global, a *International Commission on Large Dams* (ICOLD) indica que existem aproximadamente 36.000 grandes barragens cadastradas no *World Register of Dams*, com cerca de 300 acidentes reportados ao longo da história, resultando em uma taxa de falha global da ordem de 1%, com redução significativa nas últimas décadas em função da evolução técnica e da sistematização de lições aprendidas. (ICOLD, 2024). Análise baseada no Boletim 99 da ICOLD mostra que, enquanto cerca de 2,2% das barragens construídas antes de 1950 falharam, esse percentual é inferior a 0,5% para barragens construídas após 1950, evidenciando melhora relevante atribuída à disseminação de boas práticas de projeto, construção, operação e monitoramento. (*International Hydropower Association*, 2015). Ainda assim, estudos recentes indicam que, mesmo com a redução da taxa de falhas, o risco residual permanece relevante, com falhas anuais observadas principalmente em estruturas menores e mais antigas. (Nasser, 2025).

Conceitualmente, a segurança de barragens tem evoluído de uma visão predominantemente estrutural para uma abordagem integrada de gestão de riscos. No Brasil, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) define segurança de barragens como a condição que visa manter a integridade estrutural e operacional da barragem, preservando vida, saúde, patrimônio e meio ambiente. (Brasil, 2010; Brasil, 2020; Silva; Mattos; Silva, 2023). Em âmbito internacional, organismos como o Banco Mundial e a *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) entendem a segurança de barragens como um conjunto de ações técnicas e de gestão que incluem projeto, construção, operação, manutenção, monitoramento e preparação para

emergências, apoiados em princípios de gestão de riscos, tolerabilidade de risco e aplicação do conceito ALARP (*as low as reasonably practicable*). (World Bank, 2021; FEMA, 2004 apud Silva; Mattos; Silva, 2023).

No plano normativo e institucional internacional, o Banco Mundial publicou a *Good Practice Note on Dam Safety*, que orienta a aplicação dos requisitos de segurança de barragens à luz do *Environmental and Social Framework* (ESF) e propõe explicitamente uma abordagem baseada em risco ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas, planejamento, projeto, construção, operação, descomissionamento e descaracterização. (World Bank, 2021). Em paralelo, análises comparativas de marcos regulatórios em diversos países mostram que regimes de segurança mais robustos tendem a combinar legislação clara, autoridades fiscalizadoras estruturadas, sistemas de informação consolidados e cultura de transparência e aprendizagem a partir de incidentes e acidentes. (World Bank, 2020).

No Brasil, o marco central é a Lei nº 12.334/2010, atualizada pela Lei nº 14.066/2020, que instituiu a PNSB, criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), estabeleceu instrumentos como o Plano de Segurança de Barragens (PSB), a classificação por Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) e consolidou a responsabilidade legal do empreendedor pela segurança da barragem e pelos danos decorrentes de ruptura, vazamentos ou mau funcionamento. (Brasil, 2010; Silva; Mattos; Silva, 2023). A PNSB aplica-se a barragens de acumulação de água, rejeitos de mineração e resíduos industriais que apresentam, entre outros critérios, altura do maciço ≥ 15 m, volume $\geq 3.000.000$ m³ ou enquadramento em categorias elevadas de DPA ou risco. (Silva; Mattos; Silva, 2023).

O Relatório de Segurança de Barragens (RSB) de 2023, coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), indica que 25.943 barragens estavam cadastradas no SNISB em 3 de janeiro de 2024, distribuídas por múltiplos usos (irrigação, dessedentação animal, regularização de vazões, abastecimento humano, hidrelétricas, disposição de rejeitos e resíduos, entre outros) (ANA, 2024). Deste total, 11.708 barragens (45%) já estavam classificadas quanto ao Dano Potencial Associado e 10.617 (41%) quanto à Categoria de Risco, refletindo avanços, mas também um passivo significativo de estruturas ainda não plenamente caracterizadas do ponto de vista de segurança. (ANA, 2024). Estudos recentes mostram, ainda,

que o país enfrenta dificuldades relevantes na obtenção de informações técnicas, na disponibilidade de equipes especializadas e na fiscalização sistemática das barragens, o que reforça a necessidade de consolidar, na prática, o marco institucional e regulatório já estabelecido. (Silva; Mattos; Silva, 2023). Dentro desse contexto, a compreensão e o aprimoramento contínuo da segurança de barragens, em sintonia com as melhores práticas internacionais, tornam-se elementos centrais para a gestão de riscos hidrológicos, geotécnicos e socioambientais no Brasil e no mundo.

1.2. IMPORTÂNCIA DA ESTABILIDADE DE TALUDES PARA A SEGURANÇA DE BARRAGENS

A estabilidade dos taludes de montante e jusante é um dos pilares centrais da segurança de barragens de aterro, pois condiciona diretamente a integridade estrutural do maciço e da fundação. Manuais clássicos de engenharia de taludes, como o EM 1110-2-1902 do *United States Army Corps Of Engineers* (USACE), tratam a análise de estabilidade de taludes de barragens de terra e enrocamento como requisito básico de projeto e avaliação, estabelecendo critérios de resistência, condições de análise e fatores de segurança mínimos para garantir desempenho adequado ao longo da vida útil da estrutura (USACE, 2003). Estudos mais recentes voltados à avaliação de risco destacam que a instabilidade de taludes é um dos modos de falha fundamentais a ser considerado na análise de desempenho de barragens e diques (*United States Bureau Of Reclamation*, 2019; Duncan; Wright; Brandon, 2014).

Sob a ótica da segurança estrutural, taludes instáveis podem evoluir desde movimentos superficiais localizados até deslizamentos profundos que mobilizam grande parte do maciço ou da fundação, com potencial de levar à ruptura parcial ou total da barragem. Guias internacionais de segurança de barragens, como os da ICOLD, apontam defeitos de fundação, incluindo recalques e instabilidade de taludes, entre as causas recorrentes de falhas, ao lado de galgamento e processos de erosão interna (ICOLD, 2024). Em estudos que analisam estatisticamente acidentes e incidentes em barragens de terra e de rejeitos, a instabilidade de taludes é reiteradamente citada como uma das causas mais críticas, sobretudo em estruturas de aterro sujeitas a variações de nível de água, carregamentos extremos e condições construtivas ou de drenagem inadequadas (ICOLD, 2001; Lyu et al., 2019; Vecchi et al., 2024).

No contexto brasileiro, a importância da estabilidade de taludes para a segurança de barragens é reforçada pelos documentos estruturantes do SNISB e pelo Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Volume VIII, que identificam a “perda de estabilidade dos paramentos ou dos taludes do reservatório” como uma das principais anomalias observadas em barragens de terra, frequentemente associada a situações de risco elevado (ANA, 2016). Materiais recentes voltados à segurança de barragens de terra em âmbito estadual, como o guia produzido pelo Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL), também enfatizam que deslizamentos ou desmoronamentos nos taludes de montante e jusante podem comprometer a estabilidade global da estrutura, exigindo monitoramento frequente, eventual rebaixamento de nível e ações corretivas imediatas (Marques, 2023).

Além do risco imediato de ruptura, a instabilidade de taludes influencia outros mecanismos de deterioração relevantes para a segurança, como a formação de trincas, a alteração do regime de percolação e a concentração de esforços, favorecendo processos de erosão interna e de *seepage* (*Seepage Analysis And Control For Dams*, 1993; Carneiro, 2022). Por essa razão, diretrizes nacionais e internacionais de segurança de barragens convergem no sentido de exigir análises de estabilidade em diferentes condições de carregamento (nível normal, cheias, rebaixamento rápido, ações sísmicas, entre outras), a definição de fatores de segurança compatíveis com a classe de risco e o potencial de dano associado, e a integração dos resultados de estabilidade aos processos de inspeção, revisão periódica e gestão de risco (ANA, 2016; USBR, 2019; USACE, 2003). Nesse contexto, a estabilidade de taludes deixa de ser um aspecto apenas de cálculo geotécnico e passa a ser um elemento estruturante da política de segurança de barragens, com impacto direto na prevenção de acidentes de grande magnitude.

1.3. SINISTROS HISTÓRICOS DE BARRAGENS E SUAS CONSEQUÊNCIAS

A literatura internacional sobre segurança de barragens mostra que, embora a taxa de falhas seja relativamente baixa quando comparada ao número total de estruturas em operação, os eventos de ruptura têm potencial para produzir desastres de grande magnitude humana, ambiental e econômica. A compilação de estatísticas de falhas e incidentes em barragens de aterro, baseada em um banco de dados com mais de 11.000 estruturas, evidencia que falhas completas e incidentes graves, embora raros em termos de probabilidade anual, representam um risco

inaceitável devido às consequências catastróficas associadas à ruptura súbita de reservatórios de grande porte (Foster; Fell; Spannagle, 2000). Em síntese, o histórico internacional demonstra que a ocorrência de poucos eventos já é suficiente para justificar uma abordagem extremamente conservadora em projeto, operação e monitoramento de barragens.

No âmbito dos mecanismos de ruptura, o Boletim 164 do ICOLD, baseado em um conjunto de 11.192 barragens de aterro, indica que aproximadamente 48% das falhas documentadas estão associadas a erosão externa por galgamento, 46% a erosão interna em barragens ou fundações, 4% a instabilidade estrutural/geométrica e 2% a ações sísmicas (ICOLD, 2013). Estudos complementares reforçam que a erosão interna é, hoje, reconhecida como uma das principais causas de ruptura de barragens de terra e enrocamento, frequentemente associada a deficiências de projeto de filtros, zonas drenantes e controle de pressões neutras (Fell, 2007). Assim, muitos dos sinistros históricos mais graves envolvem, direta ou indiretamente, a perda de estabilidade dos taludes em consequência de processos erosivos internos ou de galgamento, o que conecta diretamente a temática da estabilidade de taludes à segurança global de barragens.

Entre os desastres internacionais mais emblemáticos, o rompimento da barragem de Banqiao, na China, em agosto de 1975, durante o episódio do tufão Nina, é frequentemente citado como um dos mais letais da história. Relatos consolidados por organismos internacionais e análises históricas indicam que a ruptura da barragem e de dezenas de estruturas associadas produziu uma onda de cheia que afetou uma área de aproximadamente 12.000 km², destruindo milhões de edificações e impactando mais de 10 milhões de pessoas (*Encyclopaedia Britannica*, 2025; Watkins, 2005). O número de mortes é estimado entre 26.000 e 240.000, sendo amplamente citado o valor oficial de cerca de 26.000 óbitos causados diretamente pelas inundações e aproximadamente 145.000 mortes subsequentes associadas a epidemias e fome na região afetada (*Encyclopaedia Britannica*, 2025; VGO INC., 2016). Outros acidentes clássicos, como as rupturas de Malpasset (França, 1959) e Teton (Estados Unidos, 1976), ainda que com menor número de vítimas, reforçam o padrão de consequências devastadoras, com destruição rápida de áreas urbanas a jusante, perdas humanas significativas e elevados custos de reconstrução, frequentemente superiores a bilhões de dólares, além de impactos reputacionais e regulatórios duradouros nos setores de infraestrutura e energia.

No caso de barragens de rejeitos de mineração, a estatística de acidentes é ainda mais preocupante. Palu e Julien (2019), ao revisar falhas de barragens de rejeitos no Brasil, destacam que acidentes com esse tipo de estrutura ocorrem “em todo o mundo com taxas alarmantes” e que, em uma base de dados de 30 anos (1970-1999), foram registradas de 2 a 5 grandes rupturas por ano, com pelo menos dois eventos anuais em todo o período analisado (Palu; Julien, 2019). A comparação de Davies (2002), sintetizada por Palu e Julien, indica que a taxa de falhas de barragens de rejeitos é aproximadamente dez vezes maior que a de barragens de usos convencionais (água para abastecimento, irrigação ou energia), evidenciando uma vulnerabilidade estrutural e operacional diferenciada para esse tipo de empreendimento (Palu; Julien, 2019). No contexto brasileiro, os mesmos autores identificam 12 grandes rupturas de barragens de rejeitos desde 1986, resultando em mais de mil mortes e danos ambientais que se estendem por milhares de quilômetros de cursos d’água, o que transforma esses sinistros em problemas de segurança hídrica e de saúde pública em escala de bacia (Palu; Julien, 2019).

A ruptura da barragem de rejeitos de Fundão, em Mariana (MG), em 5 de novembro de 2015, é descrita por diversos autores como o maior desastre tecnológico da mineração brasileira em um contexto global (Carmo et al., 2017; Palu; Julien, 2019). Estudos hidrossedimentológicos indicam que o colapso liberou da ordem de 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro, gerando um fluxo hiperconcentrado que percorreu aproximadamente 570 km ao longo do rio Doce até a foz no Oceano Atlântico, com concentrações máximas de sólidos em suspensão da ordem de 400.000 mg/L em trechos do curso d’água (Palu; Julien, 2019). A destruição da comunidade de Bento Rodrigues e de outros povoados a jusante resultou em 19 mortes, deslocamento forçado de centenas de famílias, perda de infraestrutura e impactos duradouros sobre a ictiofauna, a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos e ripários da bacia do rio Doce (Carmo et al., 2017; Hatje et al., 2017). Além dos danos ambientais, o evento desencadeou amplos debates sobre governança da mineração, responsabilidade civil e penal, e a suficiência dos instrumentos de fiscalização e licenciamento ambiental no Brasil (Valencio, 2019).

A década seguinte reforçou a recorrência e a gravidade dos sinistros com barragens no país. Em maio de 2009, a ruptura da barragem de Algodões I, no Piauí, voltada ao armazenamento de água para usos múltiplos, provocou a morte de nove pessoas, mais de 90 feridos, destruição de moradias, perda de rebanhos e lavouras e uma onda de cheia que atingiu

alturas de até 20 m no vale do rio Pirangi, com forte desterritorialização de famílias atingidas (Soares; Viana, 2016). Em 25 de janeiro de 2019, a ruptura da barragem de rejeitos B1 da mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), liberou aproximadamente 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos, ocasionando a morte de cerca de 270 pessoas, na maioria trabalhadores da própria mina, e soterrando instalações operacionais e estruturas administrativas da empresa (Palu; Julien, 2019; Maluf et al., 2022). Estudos ambientais registraram concentrações elevadas de metais e efeitos tóxicos sobre diferentes níveis tróficos na bacia do rio Paraopeba, bem como comprometimento severo da qualidade da água e impactos sociais significativos sobre comunidades ribeirinhas (Vergílio et al., 2020; Fernandes et al., 2025). Esses casos recentes, somados a outros eventos históricos, consolidam a compreensão de que a estabilidade de taludes, tanto do corpo da barragem quanto de taludes naturais e artificiais a jusante, é elemento central para a prevenção de catástrofes, com implicações diretas para o projeto, a operação, a instrumentação e a regulação das estruturas de barramento.

1.4. DELIMITAÇÃO DO ESCOPO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, delimita-se como objeto central a análise da estabilidade de taludes de barragens de terra homogêneas, com ênfase em sua relação com a segurança de barragens. Do ponto de vista teórico e metodológico, o estudo se insere na tradição de análises de equilíbrio limite para taludes, reforçada pelo uso de modelos numéricos que acoplam fluxo de água e estabilidade, tal como apresentado no manual *Stability Modeling with SLOPE/W*, em que se destaca o emprego do módulo SLOPE/W do pacote GeoStudio em problemas de estabilidade de encostas e barragens de terra (Seequent Limited, 2022). Estudos recentes de taludes de barragens de terra evidenciam que a utilização conjunta dos módulos SEEP/W e SLOPE/W para avaliar os campos de poropressão e os fatores de segurança sob diferentes cenários de carregamento (como regime permanente e rebaixamento rápido) constitui prática consolidada na literatura internacional de engenharia geotécnica aplicada a barragens (Kar; Roy, s.d.).

Metodologicamente, o trabalho limita-se a uma modelagem bidimensional em seção transversal típica de uma barragem de terra hipotética, adotando geometria e parâmetros geotécnicos representativos de solos compactados usuais em barragens de aterro, sem pretensão

de reproduzir um caso real específico. Essa opção segue abordagens amplamente utilizadas em estudos numéricos de barragens de terra, nos quais se empregam perfis idealizados e propriedades mecânicas plausíveis para investigar a influência de variáveis geométricas, condições de carregamento e soluções de drenagem sobre os fatores de segurança (Seequent Limited, 2022; Kar; Roy, s.d.). Foram considerados cenários típicos de operação hidrológica do reservatório, por exemplo, condições de escoamento em regime permanente e situação de rebaixamento rápido, com identificação de superfícies críticas de escorregamento a partir de critérios clássicos de equilíbrio limite. Não foram abordados efeitos sísmicos, análises tridimensionais, avaliações probabilísticas de confiabilidade nem o tratamento quantitativo de séries de instrumentação de auscultação.

No campo regulatório e institucional, o estudo foi balizado principalmente pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010, a qual define objetivos, fundamentos, competências e instrumentos voltados à gestão da segurança de barragens no Brasil (Brasil, 2010). Complementarmente, foi considerada a síntese recente do estado da segurança de barragens apresentada no Relatório de Segurança de Barragens (RSB) 2023, documento em que a ANA consolida informações sobre cadastro, enquadramento na PNSB, classificação por categoria de risco e dano potencial associado, estruturação dos órgãos fiscalizadores e histórico de acidentes e incidentes (ANA, 2023). A análise regulatória, entretanto, não pretende esgotar o arcabouço jurídico da PNSB; limitar-se-á aos aspectos que dialogam diretamente com a estabilidade de taludes, como o papel das anomalias em taludes e sistemas de drenagem nos mecanismos de falha e sua relação com a classificação de barragens segundo critérios técnicos de segurança.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise completa de estabilidade de taludes em uma barragem de terra homogênea fictícia, com o objetivo de contribuir para a sistematização de metodologias e para o embasamento técnico de estudos geológicos e geotécnicos voltados à segurança de barragens.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reunião e apresentação de parâmetros usuais de tipos de solos;
- Coletânea de boas práticas, bibliografia, normas e legislação pertinentes;
- Discussão sobre a importância de análises de estabilidade aplicada à segurança de barragens;
- Execução e análise de modelagens de barramentos de terra por meio do software GeoStudio;

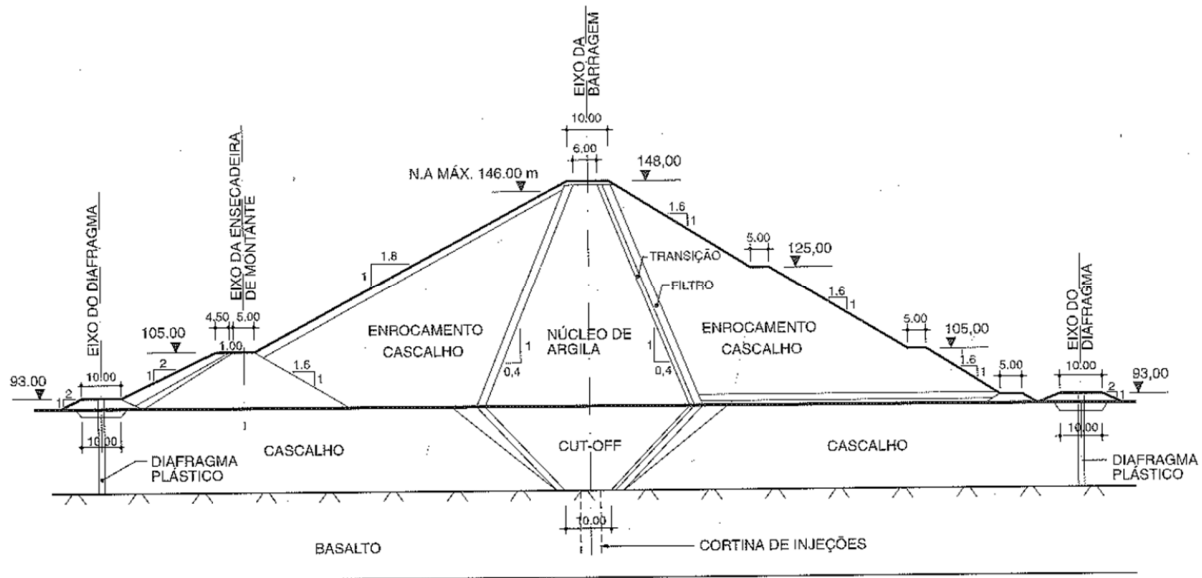
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TIPOS DE BARRAGENS DE TERRA E SUAS GEOMETRIAS TÍPICAS

As barragens de terra são estruturas constituídas essencialmente por solos compactados que utilizam o próprio peso para resistir aos esforços atuantes. Manuais internacionais destacam que os aterros de terra são o tipo de barragem mais comum no mundo, em razão da simplicidade construtiva, do uso de materiais locais e da adaptabilidade a diferentes condições de fundação (Stephens, 2010). A literatura de projeto de barragens de terra e enrocamento do USACE também enquadra essas estruturas na categoria geral de barragens de aterro (*embankment dams*), ressaltando que sua concepção envolve a compatibilização entre fundação, materiais de empréstimo e requisitos de segurança, especialmente quanto à estabilidade e ao controle de percolação (United States, 2004). No contexto brasileiro, guias da ANA reforçam a importância das barragens de terra, em especial para pequenos e médios empreendimentos, enfatizando a necessidade de atenção a aspectos geométricos básicos para garantir a segurança ao longo da vida útil do empreendimento (ANA, 2016).

Independentemente do tipo estrutural, as barragens de terra apresentam um conjunto de elementos geométricos recorrentes: crista, borda livre (*freeboard*), talude de montante, talude de jusante, trincheira de vedação (*cutoff*), filtros e drenos, além de proteções superficiais contra erosão. Em material introdutório para graduandos, Carvalho (2011) lista como principais elementos de uma barragem de terra a crista, a borda livre, os taludes de montante e jusante (com suas respectivas proteções), a trincheira de vedação, filtros horizontais e verticais, dreno de pé, cortina de injeção, tapete impermeável e o sistema de drenagem de águas pluviais, entre outros (Carvalho, 2011).

Figura 1: Seção típica de uma barragem.



Fonte: Cruz, 2004.

O mesmo autor indica que a largura da crista não deve ser inferior a 3 m, mesmo em pequenas barragens, tanto por questões de estabilidade quanto para permitir o tráfego de manutenção, citando recomendações do USBR (Carvalho, 2011). Em linha semelhante, o manual da *Food and Agriculture Organization* (FAO) para pequenas barragens em terra recomenda que a largura da crista seja dimensionada considerando a altura do maciço, as características da bacia e a necessidade de acesso, estabelecendo largura mínima de 2 m e sugerindo, para barragens acima de 5 m de altura, largura padrão de 3 m ou o uso da seguinte expressão:

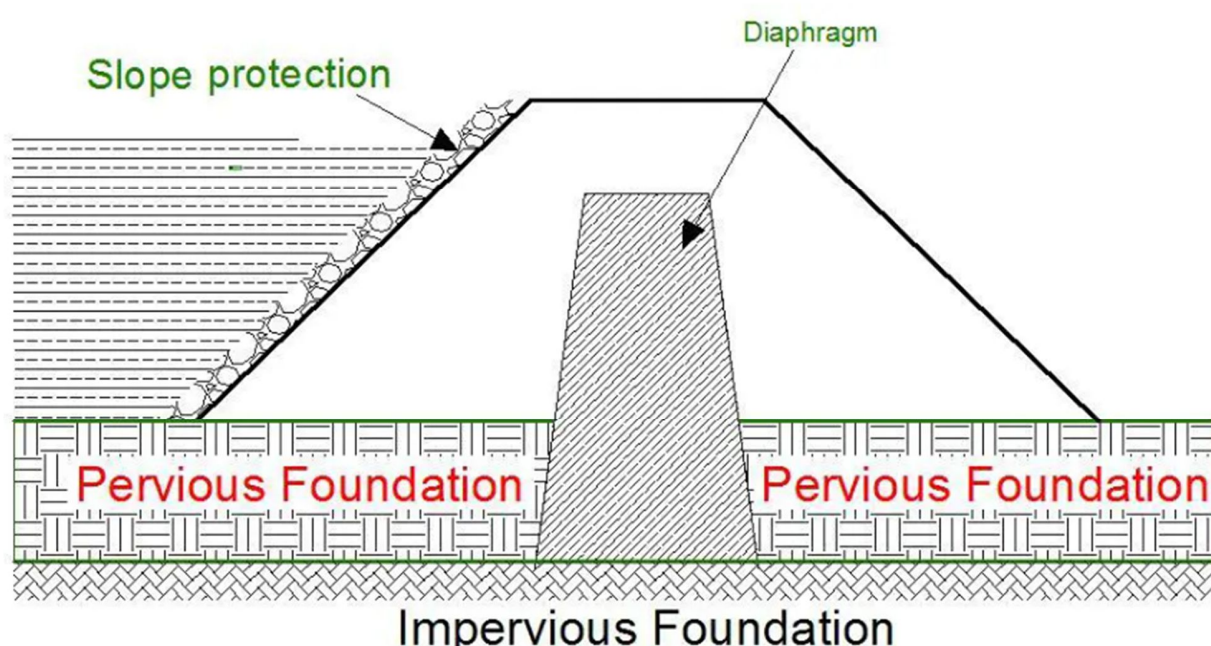
$$C_w = 0,4 * H + 1,0 \quad (1)$$

Em que C_w é a largura da crista e H a altura máxima da barragem (Stephens, 2010).

Do ponto de vista tipológico, a literatura costuma classificar as barragens de terra em três grandes grupos, segundo a distribuição interna de materiais: (a) barragens de aterro homogêneo (*homogeneous embankment*); (b) barragens zonadas (*zoned embankment*), normalmente com núcleo argiloso; e (c) barragens com diafragma impermeável (*diaphragm embankment*), em que uma “membrana” relativamente delgada garante a impermeabilidade (Ubani, 2021; Stephens, 2010). Em barragens de terra estrito senso, predominam as soluções homogêneas e zonadas,

enquanto as estruturas com diafragma frequentemente combinam terra e enrocamento na região dos ombros (*United States*, 2004). Guias de projeto de pequenas barragens publicados pela ANA empregam classificação semelhante ao tratar do “tipo estrutural” do corpo da barragem, distinguindo maciços homogêneos de maciços com zonas ou núcleos relativamente impermeáveis (ANA, 2016).

Figura 2: Seção típica de barragem com diafragma impermeável.



Fonte: Ubani, 2021.

As barragens de terra homogêneas são aquelas em que o maciço é constituído, em grande parte, por um único tipo de solo, com propriedades geotécnicas relativamente uniformes ao longo da seção transversal. O manual da FAO destaca que, embora homogeneidades “perfeitas” sejam raras em campo, a concepção homogênea assume variações modestas de permeabilidade e resistência no corpo do aterro (Stephens, 2010). Em função da maior suscetibilidade a pressões neutras elevadas e a linhas de percolação mais altas, recomenda-se que esses maciços possuam taludes relativamente planos, tipicamente da ordem de 1V:3H no paramento de montante e 1V:2H no paramento de jusante, como forma de incrementar a estabilidade global (Stephens, 2010). Normas de projeto indicam ainda que, em fundações mais impermeáveis, é usual a adoção

de elementos de drenagem, como filtros horizontais, drenos de pé ou enrocamento de jusante (*rock toe*), a fim de rebaixar a linha freática interna e reduzir o risco de instabilidade por percolação (Stephens, 2010; United States, 2004).

Nas barragens de terra zonadas, o maciço é subdividido em zonas de materiais com funções distintas: um núcleo central ou ligeiramente deslocado de montante, constituído por material de baixa permeabilidade; uma zona de montante de material semi-impermeável; e uma zona de jusante com solos mais permeáveis, desempenhando papel de estrutura resistente e de dreno (Ubani, 2021; Stephens, 2010). O manual da FAO descreve esse tipo como alternativa mais segura, particularmente para barragens de maior porte, pois reduz ao mínimo os riscos associados à percolação, ainda que à custa de maior complexidade construtiva e de logística de materiais (Stephens, 2010). Nesses casos, as inclinações dos taludes podem ser reduzidas em comparação às barragens homogêneas, com valores típicos em torno de 1V:2H no paramento de montante e 1V:1,75H no paramento de jusante (ou, quando a qualidade dos materiais é menos favorável, 1V:2,25H a montante e 1V:2H a jusante), mantendo-se, contudo, a necessidade de proteção superficial e sistemas de drenagem adequados (Stephens, 2010).

Por fim, as barragens de terra com diafragma são caracterizadas pela presença de um elemento impermeável relativamente delgado, o diafragma, inserido em um maciço de materiais mais permeáveis, que podem incluir solos ou enrocamento (Ubani, 2021). Segundo Ubani (2021), o diafragma pode ser disposto na posição central, formando um núcleo vertical, ou deslocado para montante, assumindo a forma de uma cortina ou revestimento impermeável, e pode ser executado com solos argilosos de alta compacidade, concreto, asfalto ou outros materiais com baixa permeabilidade. A geometria global desses maciços tende a ser semelhante à das barragens zonadas (com taludes moderadamente inclinados e cristas compatíveis com a altura e com o tipo de carregamento), porém a espessura do núcleo é significativamente menor, o que exige maior rigor na execução e na interface com a fundação para evitar caminhos preferenciais de percolação (United States, 2004). Em grande parte das referências consultadas, ressalta-se que, para barragens de pequeno porte destinadas a irrigação ou abastecimento rural, a escolha entre barragem homogênea ou zonada deve considerar a disponibilidade de materiais e a capacidade de controle tecnológico da obra, sendo comum a adoção de geometrias mais conservadoras em empreendimentos com menor controle construtivo (Stephens, 2010; ANA, 2016).

3.2. MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL DA SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) foi instituída pela Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010, com o objetivo de estabelecer princípios, diretrizes e instrumentos para garantir padrões adequados de segurança nas barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais (Brasil, 2010). Entre seus instrumentos centrais estão a definição de responsabilidades dos empreendedores e dos órgãos fiscalizadores, a exigência de planos e relatórios específicos de segurança e a criação do SNISB, concebido como base de dados integrada para subsidiar a gestão e o controle social da segurança de barragens (ANA; MDR, 2019).

A Lei n.º 12.334/2010 delimita o universo de barragens abrangidas pela PNSB por meio de critérios de porte e de potencial de dano: altura do maciço maior ou igual a 15 m; capacidade total do reservatório maior ou igual a 3 milhões de m³; presença de resíduos perigosos em quantidade capaz de causar dano ambiental significativo; ou, ainda, classificação com dano potencial associado médio ou alto (Brasil, 2010). Esses critérios, consolidados em documentos técnicos da ANA, buscam concentrar a regulação em estruturas cujo colapso representaria risco relevante à vida humana, ao meio ambiente, à infraestrutura e à economia (ANA; MDR, 2019).

Com o rompimento de grandes barragens de rejeitos e a percepção de lacunas na aplicação prática da PNSB, o marco legal foi substancialmente alterado pela Lei n.º 14.066, de 30 de setembro de 2020, que modificou diversos dispositivos da Lei n.º 12.334/2010 e de normas correlatas (Brasil, 2020). Essa lei ampliou e detalhou obrigações de empreendedores e órgãos fiscalizadores, endureceu o regime sancionatório e introduziu aperfeiçoamentos nos critérios de classificação de barragens, buscando fortalecer a prevenção de acidentes e a responsabilização em caso de falhas (CNM, 2020). Posteriormente, o Decreto n.º 11.310, de 26 de dezembro de 2022, regulamentou dispositivos da PNSB relativos à governança federal e às atividades de fiscalização, instituindo o Comitê Interministerial de Segurança de Barragens e detalhando a articulação entre o governo federal, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e os diversos órgãos setoriais (Brasil, 2022).

No âmbito informacional, o SNISB foi formalizado como um dos pilares da PNSB e é gerido pela ANA, que mantém o Portal Cidadão do SNISB para disponibilizar dados, relatórios,

legislação e materiais de capacitação sobre a temática (ANA, 2025; ANA, 2024). O SNISB agrega informações enviadas pelos órgãos fiscalizadores setoriais sobre cadastro, classificação de risco e dano potencial, eventos críticos, anomalias e ações de fiscalização. Essas informações são consolidadas anualmente no Relatório de Segurança de Barragens (RSB), elaborado pela ANA, que apresenta um panorama nacional da situação de segurança de barragens, estatísticas de ocorrência de incidentes e acidentes, evolução da implementação da PNSB e recomendações para o aprimoramento do sistema (ANA, 2024).

A regulamentação infralegal da PNSB, no âmbito dos usos múltiplos da água de domínio da União, foi detalhada pela Resolução ANA n.º 236, de 30 de janeiro de 2017, posteriormente atualizada pela Resolução ANA n.º 121, de 9 de maio de 2022 (ANA, 2017; 2022). A Resolução n.º 236/2017 estabelece critérios para classificação das barragens outorgadas pela ANA quanto à categoria de risco e ao dano potencial associado, define a matriz de classificação e detalha o conteúdo mínimo, o nível de detalhamento e a periodicidade de elaboração e atualização do Plano de Segurança da Barragem (PSB), da Inspeção de Segurança Regular (ISR), da Inspeção de Segurança Especial (ISE), da Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB) e do Plano de Ação de Emergência (PAE) (ANA, 2017). A Resolução n.º 121/2022 ajusta e atualiza dispositivos da Resolução n.º 236/2017, alinhando-os às alterações promovidas pela Lei n.º 14.066/2020 e ao avanço da prática regulatória (ANA, 2022).

Do ponto de vista institucional, a PNSB define como “órgãos fiscalizadores de segurança de barragens” aqueles responsáveis pela outorga de uso de recursos hídricos, licenciamento ambiental ou regulação setorial, a depender do tipo de barragem (ANA; MDR, 2019). No caso de barragens para geração hidrelétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é a entidade responsável pela fiscalização da segurança de barragens quando o uso preponderante do potencial hidráulico é a geração de energia, cabendo-lhe regulamentar critérios de classificação, PSB, RPSB, ISR e PAE para essas estruturas (ANEEL, 2024). Para barragens de usos múltiplos da água em corpos hídricos de domínio da União, a ANA atua como órgão fiscalizador; para corpos d’água de domínio estadual, essa atribuição cabe aos órgãos estaduais de recursos hídricos; já para barragens de resíduos industriais, a fiscalização cabe aos órgãos licenciadores ambientais, e, no caso de estruturas de rejeitos de mineração e resíduos nucleares, à Agência Nacional de Mineração (ANM) (ANA, 2025).

3.3. NORMAS TÉCNICAS E DIRETRIZES APLICÁVEIS À ESTABILIDADE DE TALUDES

No contexto brasileiro, a principal referência normativa geral para estabilidade de taludes é a ABNT NBR 11682:2009 – Estabilidade de encostas. O escopo da norma “prescreve os requisitos exigíveis para o estudo e controle da estabilidade de encostas e de taludes resultantes de cortes e aterros realizados em encostas” e “abrange também as condições para estudos, projeto, execução, controle e observação de obras de estabilização”. Diversos resumos e materiais de apoio sobre a NBR 11682 destacam que ela reúne diretrizes desde a investigação geotécnica até a execução e manutenção das obras, com foco em reduzir o risco de deslizamentos em áreas suscetíveis.

Embora não seja específica para barragens, a NBR 11682 é amplamente utilizada em projetos de taludes em obras lineares, muros de contenção e escavações profundas, sendo frequentemente citada como base para critérios de segurança e dimensionamento. Estudos sobre gestão de taludes em rodovias, por exemplo, apontam que a norma exige, como etapa preliminar, a elaboração de laudos de vistoria para embasar o projeto de estabilização. Materiais técnicos sobre muros em blocos segmentados também assinalam que a NBR 11682 “estabelece os requisitos para o estudo e controle da estabilidade de encostas e taludes, além do dimensionamento adequado do muro”, reforçando seu papel como norma guarda-chuva para diferentes tipologias de contenção. Esse arcabouço é diretamente aplicável à análise de taludes de barragens de terra, na medida em que as encostas naturais e aterros previstos na norma são análogos, em termos geotécnicos, aos taludes de maciços compactados.

No caso específico de barragens de mineração, a referência normativa central é a ABNT NBR 13028 – Mineração: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água, Requisitos, atualmente em sua 4ª edição (2024), que substitui a edição de 2017. O texto normativo define termos como “barragens de mineração”, “alteamento de barragens” e “superfície freática crítica” e descreve os métodos de alteamento (jusante, linha de centro e montante), ressaltando a necessidade de especial atenção ao método a montante quanto à engenharia dos rejeitos, drenagem interna e análises em condições não drenadas. A norma estabelece requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projetos, abrangendo caracterização geotécnica dos materiais, definição de métodos construtivos, critérios

hidrológicos e hidrogeológicos, e explicita que o objetivo é garantir segurança, operabilidade, economicidade, desativação adequada e minimização de impactos ambientais.

Um aspecto particularmente relevante da NBR 13.028 para a estabilidade de taludes é a previsão de tabelas com fatores de segurança mínimos para barragens de mineração e de concreto, bem como de períodos de retorno mínimos para o dimensionamento de sistemas extravasores. Em versões anteriores e em textos comentados, a norma explicita que “as análises de estabilidade das barragens devem apresentar, no mínimo, os fatores de segurança apresentados na Tabela” correspondente, vinculando esses valores às diferentes condições de carregamento e fases de vida útil (por exemplo, operação, fim da construção ou condição excepcional). Em síntese, enquanto a NBR 11682 orienta o processo geral de estudo e controle de taludes, a NBR 13.028 traduz esse processo em requisitos específicos para barragens de mineração, integrando estabilidade de taludes, regime de fluxo subterrâneo e critérios hidrológicos num mesmo corpo normativo.

No plano internacional, uma referência amplamente reconhecida para análises de estabilidade de taludes em barragens de terra e enrocamento é o manual USACE EM 1110-2-1902 – Slope Stability. Esse manual afirma, em seu escopo, que fornece “orientação para a análise da estabilidade estática de taludes de barragens de terra e enrocamento, taludes de outros tipos de aterros, taludes escavados e encostas naturais em solos e rochas brandas”. O documento descreve métodos de análise de estabilidade (por exemplo, métodos de equilíbrio limite) e os ilustra por meio de exemplos, além de apresentar critérios para ensaios de resistência, condições de análise e fatores de segurança, a serem utilizados com métodos que satisfaçam todas as condições de equilíbrio. Na prática, o EM 1110-2-1902 funciona como um guia de boas práticas para definição de superfícies críticas, seleção de parâmetros resistentes e verificação de estados limite em barragens de terra, sendo frequentemente citado em manuais de projeto de barragens de terra e enrocamento.

As diretrizes do ICOLD complementam esse quadro. A página institucional de segurança de barragens da ICOLD destaca que defeitos de fundação, incluindo recalques e instabilidade de taludes, estão entre as causas frequentes de ruptura de barragens, ao lado de galgamento e *piping*, reforçando o papel central da estabilidade de taludes na segurança global da estrutura. O recente

Tailings Dam Safety Bulletin, em processo de consolidação, inclui um capítulo específico sobre estabilidade de taludes, no qual se enfatiza a necessidade de considerar condições drenadas, não drenadas e sísmicas, e de empregar tanto análises em equilíbrio limite quanto análises numéricas de deformações para casos complexos. Materiais de *workshops* associados a esse boletim indicam fatores de segurança-alvo típicos para barragens de rejeitos, por exemplo, valores mínimos superiores a 1,5 para condições estáticas e superiores a 1,1 para situações pós-liquefação (condição de estabilidade da estrutura imediatamente após o desencadeamento do fenômeno de liquefação), condicionados à adoção de boas práticas de investigação, seleção de parâmetros e monitoramento.

Por fim, diretrizes recentes de caráter global, compiladas por autores como Schnaid et al. (2020), sistematizam recomendações de órgãos como *International Council on Mining and Metals* (ICMM), *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM) e *Australian National Committee on Large Dams* (ANCOLD) para fatores e segurança mínimos em análises de estabilidade de taludes de barragens de rejeitos. O artigo destaca que as normas contemporâneas recomendam que a escolha dos fatores de segurança considere explicitamente a variabilidade e incerteza dos materiais, o modo de ruptura (incluindo mecanismos frágeis e liquefação), as condições de carregamento e a qualidade dos sistemas de gestão de risco, indo além de valores fixos e descontextualizados.

3.4. BOAS PRÁTICAS DE ENGENHARIA EM PROJETO, CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E MONITORAMENTO

Boas práticas de engenharia em barragens de terra exigem uma abordagem de ciclo de vida, integrando as fases de planejamento e projeto, construção, primeiro enchimento, operação e descomissionamento, com foco explícito na segurança. O Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Volume VIII deixa claro que a segurança deve ser tratada de forma sistemática ao longo de todas essas fases, com adoção de medidas de prevenção, controle e preparação para emergências proporcionais ao porte e ao risco da obra (ANA, 2016). De forma convergente, manuais internacionais, como o *Manual on Small Earth Dams* da FAO, bem como o *Earth Manual* do USBR, reforçam que o desempenho seguro de barragens de terra depende da

integração entre investigações geotécnicas, concepção adequada, execução controlada e operação com manutenção e monitoramento contínuos (Stephens, 2010; USBR, 1998).

Na fase de projeto, as boas práticas concentram-se em três eixos principais: estudos de base, concepção geométrica e arranjo hidráulico-geotécnico. O manual da FAO orienta que pequenas barragens de terra só devem ser implantadas após reconhecimento detalhado do sítio (geologia, fundações, disponibilidade e qualidade dos materiais de empréstimo), definição de seções-tipo adequadas e verificação rigorosa da capacidade do extravasor e das estruturas de descarga para evitar galgamentos (Stephens, 2010). O Manual do Empreendedor recomenda que o projeto seja compatível com o risco e o dano potencial associado, enfatizando a necessidade de considerar a PNSB e de estruturar o Plano de Segurança da Barragem com diretrizes para projeto, operação, inspeções, monitoramento e emergência (ANA, 2016).

Quanto aos aspectos geotécnicos, manuais de referência como o EM 1110-2-2300 do USACE e o *Design of Small Dams* do USBR estabelecem boas práticas claras: definição de zonas internas (núcleo, filtros, drenos e ombreiras), critérios de fundação, escolha de taludes estáveis e proteção dos paramentos contra erosão superficial. O EM 1110-2-2300 dedica capítulos específicos à seleção de materiais, critérios de compactação, filtros, drenos e proteção de taludes, indicando que o controle da percolação e da erosão interna é central para a segurança (USACE, 2004). Já o *Design of Small Dams* enfatiza o papel dos filtros e da drenagem interna no controle de subpressões e de erosão interna, bem como a necessidade de compatibilizar estabilidade de taludes com critérios hidráulicos e funcionais do barramento (USBR, 1987).

Na etapa de construção, as boas práticas convergem para o controle tecnológico rigoroso e para a rastreabilidade do que foi executado. O manual da FAO apresenta orientações detalhadas sobre preparo da fundação, seleção e homogeneização do material de aterro, espessura das camadas, tipos de equipamentos e técnicas de compactação, destacando a importância de trabalhar o solo na faixa adequada de umidade para obter densidade e resistência compatíveis com o projeto (Stephens, 2010). O EM 1110-2-2300 e o *Earth Manual* compilam procedimentos padrão de ensaio e controle de campo para solos utilizados em barragens, enfatizando o registro sistemático de dados de compactação, ensaios de laboratório e inspeções de campo, de modo a

permitir uma avaliação posterior do comportamento da barragem ao longo de sua vida útil (USACE, 2004; USBR, 1998).

Nas fases de operação e manutenção, as boas práticas estruturam-se em torno de um conjunto de documentos e rotinas: Plano de Operação, Plano de Manutenção, Plano de Monitoramento e Plano de Ação de Emergência, todos articulados ao Plano de Segurança da Barragem. O Manual do Empreendedor explicita que a segurança de pequenas barragens depende da adoção de medidas de prevenção e controle (inspeções periódicas, manutenção de estruturas hidráulicas, gestão de vegetação, desassoreamento local, correção de erosões, entre outras) e que essas medidas devem ser formalizadas em planos e procedimentos claros para o empreendedor e sua equipe (ANA, 2016). O curso de Segurança de Barragens coordenado pela ANA reforça que a avaliação da segurança deve ser um processo rotineiro, com identificação de problemas, suas causas prováveis e recomendações de medidas preventivas e corretivas, e que a classificação de níveis de segurança e emergência se integra diretamente ao PAE.

O monitoramento e a auscultação constituem um eixo fundamental das boas práticas de segurança. O curso de Segurança de Barragens da ANA define que os processos de “monitoramento de barragens”, também denominados “auscultação de barragens”, são compostos de inspeções visuais e instrumentação, devendo atuar de forma contínua nas fases de projeto e construção, primeiro enchimento e operação, com vistas à adequada avaliação estrutural, funcional e hidrológica. Em complemento, a literatura técnica sobre instrumentação de auscultação destaca que os instrumentos devem ter seus objetivos claramente definidos, ser previstos em projeto com valores-limite estabelecidos, e que a qualidade dos resultados depende de manutenção frequente, validação periódica das leituras, boas condições de acesso e preparo de procedimentos operacionais padrão para as medições (Cardia, s.d.).

Por fim, boas práticas recomendam que inspeções visuais, manutenção, instrumentação e gestão de emergência sejam integradas em um sistema de gestão da segurança. O curso da ANA aponta que a maioria das emergências pode ser identificada visualmente, razão pela qual inspeções sistemáticas, com pessoal treinado e roteiros estruturados, são indispensáveis e devem ser articuladas com as informações instrumentais na definição de níveis de segurança e na tomada de decisão. Essa visão é compatível com o Manual do Empreendedor, que vincula o Plano de

Segurança da Barragem a instrumentos como inspeções regulares, relatórios de segurança, monitoramento e PAE, reforçando que a segurança efetiva depende da aplicação consistente dessas boas práticas ao longo de toda a vida da barragem (ANA, 2016).

3.4.1. Instrumentação de auscultação aplicada à avaliação da estabilidade de taludes

A instrumentação de auscultação em barragens é entendida como o conjunto de instrumentos instalados no corpo e na fundação da estrutura, destinados a medir grandezas físicas relacionadas ao seu comportamento, de forma a permitir a avaliação contínua das condições de segurança ao longo da vida útil da obra (Dias, 2018; Rodrigues et al., 2022). Na prática, mede-se principalmente nível d'água, pressões neutras, deslocamentos, deformações, vazões de percolação, temperatura e, em alguns casos, tensões internas, constituindo a “principal ferramenta na avaliação das condições de segurança” de barragens, por permitir detectar variações associadas a processos de envelhecimento ou a alterações ambientais que possam comprometer a durabilidade ou a estabilidade das estruturas (Dias, 2018; ANA, [s.d.]).

No contexto específico da estabilidade de taludes, a instrumentação direciona-se, sobretudo, ao monitoramento do regime de percolação e das deformações do maciço. Em relação à percolação, instrumentos como piezômetros (Casagrande, elétricos ou de corda vibrante), indicadores de nível d'água (INA), poços de observação e medidores de vazão em drenos e surgências permitem determinar a posição da linha freática, a distribuição de pressões neutras e a evolução de vazões de infiltração ao longo do tempo (EM 1110-2-1908; USACE, 1995; USBR, 1987). Esses parâmetros estão diretamente associados a mecanismos clássicos de instabilidade em taludes de barragens de terra, como o escorregamento do talude de jusante por excesso de subpressão, gradientes elevados e *piping*, que são explicitamente mencionados nos manuais de análise de percolação em barragens do *United States Army Corps of Engineers* (USACE, 1986).

Paralelamente ao controle das pressões de água, a instrumentação geotécnica voltada à estabilidade de taludes inclui dispositivos para medição de deslocamentos e deformações, tais como marcos superficiais (topográficos), marcos de recalque, extensômetros, inclinômetros e, em barragens de concreto, medidores triortogonais e sistemas de “três pinos” (Dias, 2018; EM 1110-2-1908; USACE, 1995). Leituras sistemáticas desses instrumentos permitem acompanhar recalques da crista, movimentos diferenciais entre blocos ou trechos de taludes e tendências de

deslocamentos horizontais e verticais, que podem constituir sintomas precoces de perda de estabilidade, especialmente quando associados a alterações concomitantes no regime de percolação. Diretrizes internacionais de segurança de barragens destacam que padrões anômalos de recalques e movimentos de taludes, observados por meio da instrumentação, frequentemente precedem processos de deterioração estrutural e devem ser encarados como sinais de alerta em avaliações rotineiras de segurança (*Washington State Department Of Ecology*, 2002; Rodrigues et al., 2022).

Estudos de caso nacionais reforçam o papel da instrumentação de auscultação como base objetiva para a avaliação da estabilidade de taludes em barragens de terra e enrocamento. Em análise de instrumentação de barragens brasileiras, Santos (2019) descreve arranjos típicos compostos por piezômetros Casagrande, piezômetros de corda vibrante, indicadores de nível d'água e marcos superficiais distribuídos em seções críticas, mostrando como a correlação entre variações de pressões neutras, movimentações da crista e registros de vazão em drenos fornece subsídios diretos para interpretar o desempenho geotécnico dos taludes e identificar situações de risco crescente. Trabalhos que revisitam grandes acidentes de barragens, como o rompimento da barragem de Fundão, também destacam que falhas no adequado acompanhamento dos dados de instrumentação e na interpretação dos indicadores de estabilidade contribuíram para a não detecção oportuna da degradação das condições de segurança (Santos, 2019; Adamo, 2021).

Do ponto de vista de boas práticas, tanto a literatura internacional quanto documentos brasileiros convergem para a necessidade de que o sistema de instrumentação de auscultação seja concebido com objetivos claros, definidos a partir dos modos de ruptura e das condições de carregamento relevantes para a barragem (EM 1110-2-1908; USACE, 1995; ANA, s.d.). Isso implica selecionar, para cada talude, instrumentos capazes de medir as grandezas que controlam diretamente sua estabilidade (pressões neutras, recalques, deslocamentos, vazões de percolação), posicioná-los nas seções mais representativas e estabelecer rotinas de leitura, validação, armazenamento e análise que permitam a detecção rápida de tendências adversas. Diretrizes de órgãos de fiscalização enfatizam que a eficácia da instrumentação depende não apenas da instalação correta, mas também da sistematização e do tratamento dos dados, de forma a alimentar modelos de percolação e estabilidade e a subsidiar decisões operacionais e de reforço estrutural (Rodrigues et al., 2022; Dias, 2018).

Em síntese, a instrumentação de auscultação aplicada à estabilidade de taludes constitui um elo entre o comportamento real da barragem e as hipóteses teóricas adotadas em projeto. O monitoramento de pressões neutras, níveis d'água, recalques e deslocamentos fornece a base empírica para validar ou revisar análises de estabilidade em diferentes condições de carregamento (percolação em regime permanente, rebaixamentos rápidos, cheias excepcionais), integrando-se aos demais instrumentos de gestão da segurança de barragens, como inspeções visuais, planos de segurança e planos de ação de emergência (USACE, 1986; ANA, s.d.; *Washington State Department Of Ecology*, 2002). Dessa forma, a auscultação instrumental, quando adequadamente planejada e interpretada, é componente indispensável de qualquer abordagem consistente de avaliação e controle da estabilidade de taludes em barragens de terra.

3.5. PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS UTILIZADOS EM BARRAGENS DE TERRA

As barragens de terra são constituídas majoritariamente por solos naturais, normalmente organizados em zonas com funções distintas: núcleo ou corpo impermeável (geralmente argiloso), zonas de transição, filtros e drenos granulares, além de enrocamentos ou proteção superficial. O desempenho global da barragem depende diretamente das propriedades geotécnicas desses materiais, em especial da resistência ao cisalhamento, permeabilidade, compressibilidade e comportamento sob compactação. Em diretrizes modernas sobre materiais para barragens de enrocamento e terra, a *United States Society on Dams* (USSD) destaca que a seleção cuidadosa e a caracterização laboratorial dos solos de empréstimo são fundamentais para garantir estabilidade de taludes e controle de percolação ao longo de toda a vida útil do empreendimento. Publicações voltadas a pequenas barragens de terra reforçam essa mesma visão, ainda que em escala menor e com técnicas construtivas simplificadas.

Do ponto de vista de caracterização, as propriedades de identificação, granulometria, limites de Atterberg, massa específica dos grãos e classificação pelo Sistema Unificado (USCS), são o ponto de partida para avaliar a adequação de um solo às diferentes zonas do barramento. O documento *Materials for Embankment Dams* ressalta que solos finos inorgânicos (siltes e argilas, com mais de 50% de partículas < 0,074 mm) são frequentemente empregados em barragens homogêneas e núcleos de barragens zonadas, e que seu comportamento em termos de

compressibilidade, resistência e permeabilidade está fortemente associado à plasticidade e à distribuição granulométrica (USSD, 2011).

Estudos com solos lateríticos compactados, frequentemente utilizados como barreiras hidráulicas em climas tropicais, mostram, por exemplo, argilas de baixa plasticidade (CL), com limite de liquidez em torno de 40–43% e índices de plasticidade próximos de 17%, valores compatíveis com materiais de núcleo em muitas regiões tropicais (Amadi, 2013).

O comportamento sob compactação, descrito por curvas de Proctor (energia normal, intermediária ou modificada), é outra propriedade essencial para o uso de solos em barragens de terra. Ensaio em três solos lateríticos compactados sob diferentes energias (equivalentes a Proctor normal, intermediário e modificado) indicam massas específicas secas máximas variando aproximadamente entre 15,7 e 18,8 kN/m³, com teores de umidade ótima entre 12,5% e 21% (Amadi, 2013). Esses resultados ilustram como a energia de compactação e o teor de umidade controlam a estrutura do solo e, por consequência, parâmetros como permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Diretrizes para barragens de terra recomendam que essas curvas de compactação sejam usadas para estabelecer especificações de campo (faixas de umidade e energia) que garantam desempenho satisfatório em termos de deformabilidade e percolação (USACE, 2004; FEMA, 2005).

A resistência ao cisalhamento dos solos empregados no corpo da barragem é usualmente descrita por parâmetros de resistência drenada ou não drenada (coesão c'/c_u e ângulo de atrito ϕ'), obtidos por ensaios triaxiais ou de cisalhamento direto. A literatura sobre materiais para barragens destaca que solos finos de alta plasticidade tendem a apresentar menor resistência e maior suscetibilidade ao desenvolvimento de poropressões excessivas durante a construção, associando-se a maior incidência de instabilidades de taludes em aterros homogêneos (USSD, 2011). Em misturas solo–bentonita de solos lateríticos compactados, utilizadas como barreiras hidráulicas, foram reportados ângulos de atrito efetivo entre cerca de 11,3° e 20,9° e coesões efetivas entre aproximadamente 5,9 e 22,1 kPa, a depender do teor de bentonita e das condições de compactação, evidenciando ordens de grandeza típicas para materiais de barreira compactados (Amadi, 2013).

A condutividade hidráulica (k) é um parâmetro crítico para os solos empregados no núcleo e em eventuais colchas de impermeabilização de uma barragem de terra. Ensaios de permeabilidade em solos lateríticos compactados mostram que a condutividade hidráulica pode ser reduzida a valores da ordem de 10^{-10} m/s quando o solo é compactado com energia elevada (equivalente ao Proctor modificado) e teores de umidade ligeiramente úmidos em relação à umidade ótima (Osinubi; Nwaiwu, 2005). De forma análoga, misturas de solo laterítico com 7-10% de bentonita, compactadas em condições otimizadas, alcançam condutividades menores que 1×10^{-9} m/s, atendendo requisitos usuais para barreiras hidráulicas em aterros sanitários e outras obras de contenção (Amadi, 2013).

Por fim, estudos recentes com solos lateríticos compactados apontam que a condutividade hidráulica não é apenas baixa, mas também anisotrópica: valores na direção horizontal tendem a ser maiores do que na direção vertical, em função da orientação das partículas e da estrutura gerada pelo processo de compactação (Osinubi; Nwaiwu, 2005). Ensaios em células triaxiais e permeâmetros direcionais indicam que a condutividade hidráulica saturada diminui com o aumento da tensão de confinamento e com teores de umidade iniciais próximos ou ligeiramente úmidos em relação à umidade ótima, além de evidenciar diferenças significativas entre k horizontal e vertical (Osinubi; Nwaiwu, 2005). Essa anisotropia e a sensibilidade de k às condições de compactação reforçam a necessidade de especificar e controlar rigorosamente o procedimento construtivo de cada zona da barragem."

3.6. FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DOS SOLOS E DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A análise de estabilidade de taludes em barragens de terra repousa em conceitos fundamentais da mecânica dos solos, em especial o comportamento tensão–deformação, o papel das pressões de poro e a resistência ao cisalhamento dos materiais. Em termos gerais, o solo é tratado como um meio poroso em que uma estrutura de partículas sólidas é atravessada por água e ar, e o estado de tensões atuante nesse meio controla tanto a deformabilidade quanto a resistência à ruptura. Textos clássicos de mecânica dos solos enfatizam que esses conceitos são a base para o estudo de recalques, ruptura por cisalhamento e problemas de instabilidade de encostas e taludes de barragens (Verruijt, 2012).

Um primeiro pilar conceitual é o princípio das tensões efetivas. Em um solo saturado, as tensões totais podem ser decompostas em uma parcela que é transmitida pelo esqueleto sólido (tensões efetivas) e outra associada à pressão da água nos poros. Verruijt (2012) apresenta essa decomposição de forma geral como:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2)$$

Indicando que a tensão total é a soma da tensão efetiva e da pressão de poros, ressaltando que a água nos poros não contribui para a transmissão de tensões de cisalhamento e que o comportamento resistente e deformacional do solo é governado fundamentalmente pelas tensões efetivas (Verruijt, 2012). Esse princípio, introduzido por Terzaghi e amplamente aceito, é considerado um dos fundamentos da mecânica dos solos e é central na interpretação de problemas de estabilidade de taludes, especialmente em barragens de terra sujeitas a variações de nível d'água e de regime de percolação.

Sobre essa base se constrói o conceito de resistência ao cisalhamento dos solos. Resultados de ensaios de laboratório (como ensaios triaxiais e de cisalhamento direto) são usualmente representados por envoltórias de ruptura aproximadamente lineares no espaço tensão normal-tensão de cisalhamento, o que conduz ao critério de Mohr-Coulomb. Verruijt (2012) mostra que essa envoltória pode ser escrita na forma:

$$\tau = a * \sigma' + b \quad (3)$$

$$a = \sin \varphi \quad (4)$$

$$b = c \cos \varphi \quad (5)$$

Em que φ é o ângulo de atrito e c a coesão efetiva. Em termos de projeto, essa relação é frequentemente expressa como

$$\tau_f = c' + \sigma' * \tan \varphi \quad (6)$$

Reconhecendo que os parâmetros de resistência devem ser definidos em termos de tensões efetivas para condições drenadas, ao passo que, em análises em tensões totais (casos não drenados de curto prazo), utilizam-se parâmetros não drenados que já embutem a resposta de poropressões ao carregamento (Duncan; Wright; Brandon, 2014).

A ligação entre resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes é formalizada pelo conceito de fator de segurança. Em análises de estabilidade por equilíbrio limite, considera-se uma superfície potencial de ruptura e compara-se a resistência mobilizável ao longo dessa superfície com as solicitações de cisalhamento necessárias para manter o equilíbrio. Duncan (1996), em capítulo amplamente referenciado da coletânea sobre escorregamentos, define o fator de segurança FS como a razão entre a resistência ao cisalhamento disponível e a tensão de cisalhamento requerida para o equilíbrio do talude, isto é:

$$FS = \frac{\text{Resistência ao Cisalhamento}}{\text{Cisalhamento Requerido}} \quad (7)$$

Valores de $FS < 1$ indicam instabilidade (ruptura ou colapso iminente), enquanto $FS > 1$ representam condições estáveis com alguma margem de segurança. Esse conceito é adotado por múltiplos autores e documentos técnicos modernos de estabilidade de taludes.

No âmbito das barragens de terra, os métodos de análise de estabilidade mais utilizados são os de equilíbrio limite, que idealizam uma superfície de ruptura e dividem a massa potencialmente instável em fatias para satisfazer condições de equilíbrio de forças e momentos. O manual EM 1110-2-1902, estabelece que a análise da estabilidade estática de taludes em barragens de terra e enrocamento deve ser realizada por métodos que satisfaçam todas as condições de equilíbrio, apresentando critérios para ensaios de resistência, condições de análise, fatores de segurança e exemplos de aplicação (USACE, 2003). Esse documento destaca que a escolha do método (Bishop simplificado, Janbu, Spencer, entre outros) deve garantir consistência entre as hipóteses adotadas, as condições de carregamento e o nível de rigor exigido no projeto ou reavaliação de segurança.

Outro aspecto fundamental é a distinção entre condições drenadas e não drenadas, bem como a coerência entre parâmetros de resistência e regime de pressões de poros utilizado na análise. Duncan, Wright e Brandon (2014) dedicam capítulos específicos à diferença entre tensões totais e efetivas e entre resistências drenadas e não drenadas, ressaltando que análises em tensões totais são apropriadas para situações em que o carregamento é rápido e não há tempo para dissipação das poropressões, enquanto as análises em tensões efetivas e resistências drenadas se aplicam a condições de longo prazo, com regime de fluxo estabelecido. Diretrizes recentes sobre

instabilidade de taludes de aterros e barragens enfatizam que as resistências drenadas são expressas em termos de parâmetros de tensão efetiva e que a determinação da distribuição de pressões de poros requer análise de percolação (por exemplo, por redes de fluxo ou modelos numéricos de fluxo em regime permanente ou transitório), apoiada em dados de instrumentação piezométrica quando disponíveis (USBR, 2019).

Em síntese, os fundamentos da mecânica dos solos aplicados à estabilidade de taludes em barragens de terra combinam: (i) o princípio das tensões efetivas, que governa comportamento resistente e deformacional; (ii) a caracterização da resistência ao cisalhamento via critérios como Mohr–Coulomb, coerentes com ensaios de laboratório e condições de drenagem; e (iii) o uso de métodos de equilíbrio limite baseados em fatores de segurança definidos como razão entre resistência disponível e solicitações de cisalhamento para o equilíbrio. Manuais de projeto e diretrizes de órgãos oficiais como USACE e USBR consolidam esses princípios em procedimentos práticos de análise, escolhendo condições de carregamento, parâmetros de resistência e fatores de segurança-alvo compatíveis com o desempenho esperado e com a importância da estrutura para a segurança de barragens. Esses conceitos servirão de base para as modelagens e discussões desenvolvidas ao longo deste trabalho.

3.7. MÉTODOS DE ANÁLISE E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

A avaliação da estabilidade de taludes de barragens de terra e enrocamento é tradicionalmente estruturada a partir de métodos de equilíbrio limite e, mais recentemente, de abordagens numéricas baseadas em elementos finitos e diferenças finitas. O manual EM 1110-2-1902, do *United States Army Corps of Engineers*, consolida a prática convencional ao descrever procedimentos de análise de taludes de barragens de terra e rocha, discutir a seleção de parâmetros de resistência ao cisalhamento e apresentar condições de carregamento típicas (fim de construção, rebaixamento rápido, cheias e carregamentos sísmicos), bem como fatores de segurança recomendados para cada caso (USACE, 2003). Obra de referência complementar, Duncan, Wright e Brandon (2014) organizam de forma sistemática, no livro *Soil Strength and Slope Stability*, os conceitos de resistência dos solos, a definição de superfícies potenciais de ruptura e os critérios para avaliação de fatores de segurança em taludes naturais e artificiais, incluindo barragens. Revisões recentes na literatura destacam que o fator de segurança pode ser

obtido por diferentes classes de métodos que se tornaram progressivamente mais acessíveis com o aumento da capacidade computacional (Ullah; Khan; Rehman, 2020).

Os métodos de equilíbrio limite constituem a base da prática corrente em estabilidade de taludes de barragens, particularmente em contextos de projeto e reavaliação de segurança. Nesses métodos, a massa potencialmente instável é representada por um corpo rígido ou por um conjunto de fatias, e o fator de segurança é definido como a razão entre as forças ou momentos resistentes e as forças ou momentos atuantes ao longo de uma superfície de ruptura assumida (USACE, 2003). O manual EM 1110-2-1902 descreve métodos convencionais de equilíbrio limite e discute hipóteses de equilíbrio de forças e momentos (USACE, 2003). Diretrizes similares sobre a seleção de parâmetros de resistência para diferentes condições de carregamento são reforçadas em publicações mais recentes, como as do USBR (2019). Cursos e notas técnicas de capacitação em estabilidade de taludes reforçam que esses métodos permanecem a principal ferramenta de verificação global de segurança, desde que sustentados por investigação geotécnica adequada e por critérios consistentes de escolha da superfície crítica (Lifrieri, 2020; USBR, 2019).

A consolidação do uso de MEL em ambiente computacional é exemplificada por softwares especializados, como o SLOPE/W, que implementam uma família de procedimentos clássicos de equilíbrio limite em seções bidimensionais de barragens e outros taludes de engenharia. O manual *Stability Modeling with SLOPE/W* descreve como o programa discretiza o talude em fatias, permite o uso de diversos critérios de equilíbrio limite e realiza buscas automáticas por superfícies críticas, além de possibilitar análises determinísticas e estudos paramétricos de sensibilidade (*Geoslope International; Seequent, 2022*). Materiais didáticos baseados no SLOPE/W mostram o emprego rotineiro de tais métodos na análise de barragens de terra, com ênfase em geometrias reais, camadas de fundação, condições de nível d'água e combinações de carregamento propostas em guias de segurança de barragens (*Supervision Enterprise, s.d.*). Em conjunto, esses documentos reforçam que o uso de MEL em programas verificados e calibrados é o núcleo do “estado da prática” para avaliação de estabilidade global de taludes de barragens (*Geoslope International; Seequent, 2022; Lifrieri, 2020*).

Por outro lado, a estabilidade de taludes de barragens é fortemente condicionada pelo regime de poropressões, o que motivou a integração entre análise de escoamento e análise de

estabilidade. O livro *Seepage Modeling with SEEP/W - An Engineering Methodology* apresenta a formulação de elementos finitos para problemas de fluxo em meios porosos saturados e não saturados, descrevendo como perfis de pressão neutra, em condição permanente ou transitória, podem ser obtidos numericamente e exportados diretamente para modelos de estabilidade em MEL (*Geoslope International*, 2007). Documentação recente da plataforma GeoStudio destaca que a integração entre SEEP/W e SLOPE/W, bem como com módulos de tensões como SIGMA/W, permite analisar barragens sob diferentes cenários hidráulicos, incorporando poropressões no cálculo de fatores de segurança via MEL (Seequent, 2022). Guias de boas práticas em segurança de barragens recomendam expressamente que a seleção de parâmetros de resistência e a definição de poropressões sejam consistentes com carregamentos representativos (fim de construção, cheias, rebaixamento rápido), recorrendo a análises de fluxo numérico quando as hipóteses simplificadas (por exemplo, perfis hidrostáticos) não são adequadas (USBR, 2019; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021).

Complementarmente, métodos numéricos de elementos finitos e diferenças finitas vêm sendo empregados para avaliar estabilidade de taludes de barragens em situações que exigem a representação explícita de deformações, redistribuição de tensões e mecanismos progressivos de ruptura. Revisão recente dos métodos de análise de estabilidade de taludes destaca que a análise numérica permite, entre outros aspectos, aplicar o método da redução de resistência (*shear strength reduction*), no qual parâmetros de resistência são reduzidos iterativamente até a perda de estabilidade, fornecendo um fator de segurança associado ao estado limite de deformações (Ullah; Khan; Rehman, 2020).

3.7.1. Métodos de equilíbrio limite

Os métodos de equilíbrio limite (MEL) constituem, historicamente, a principal ferramenta para análise de estabilidade de taludes em encostas naturais, escavações, aterros e barragens de terra. Nesses métodos, admite-se uma superfície potencial de ruptura, geralmente contínua, que separa uma massa de solo “deslizando” de um maciço “estável”, e o problema é tratado impondo-se o equilíbrio estático (forças e/ou momentos) dessa massa. O fator de segurança é definido como a razão entre a resistência ao cisalhamento disponível, calculada a partir de um critério como Mohr-Coulomb e o cisalhamento requerido para o equilíbrio da massa ao longo da

superfície assumida (Duncan; Wright; Brandon, 2014). Esse conceito, razão entre “força resistente” e “força solicitante”, é comum à maioria dos MEL e fornece uma medida escalar de quão distante o sistema está de uma condição de ruptura iminente (USACE, 2003).

Uma formulação seminal dos MEL em problemas de taludes foi apresentada por Fellenius, que considera a massa potencialmente instável subdividida em fatias verticais, com equilíbrio de momentos em torno de um ponto situado no centro de um círculo, admitindo distribuição simplificada de esforços entre fatias (Duncan; Wright; Brandon, 2014). Métodos posteriores refinaram essas hipóteses. Bishop (método simplificado) passou a impor o equilíbrio de momentos sobre um círculo de deslizamento, incluindo o efeito das pressões de poros e das forças normais entre as fatias, ainda com hipóteses simplificadoras sobre forças tangenciais interfatias; esse método se tornou um dos mais utilizados em prática por oferecer bom compromisso entre rigor e simplicidade computacional (USACE, 2003; Duncan, 1996). Janbu, por sua vez, desenvolveu métodos gerais baseados principalmente no equilíbrio de forças, permitindo o tratamento de geometrias mais complexas, mas exigindo correções empíricas para obter fatores de segurança globalmente consistentes (Duncan; Wright; Brandon, 2014).

Os métodos mais rigorosos dentro da família dos MEL são os de Spencer e de Morgenstern-Price, classificados como métodos de equilíbrio geral. Nesses procedimentos, impõem-se simultaneamente o equilíbrio de forças e de momentos para o conjunto de fatias, admitindo-se uma função de variação para as forças interfatias (por exemplo, constante, senoidal ou linear) (Morgenstern; Price, 1965 apud Duncan; Wright; Brandon, 2014). O método de Spencer pode ser visto como um caso particular da formulação de Morgenstern-Price com razão constante entre forças de cisalhamento e normais nas interfaces, produzindo fatores de segurança únicos que satisfazem todas as condições de equilíbrio estático (USACE, 2003). O manual EM 1110-2-1902 recomenda explicitamente o uso de métodos de equilíbrio geral (Spencer ou Morgenstern-Price) em análises de estabilidade de taludes de barragens de terra e enrocamento quando se deseja maior rigor, especialmente em casos de geometrias complexas, presença de múltiplas camadas, estruturas de contenção associadas ou carregamentos especiais (USACE, 2003).

Do ponto de vista prático, a escolha do método de equilíbrio limite está diretamente ligada ao tipo de problema, à complexidade geométrica e ao nível de confiabilidade requerido. Duncan (1996) discute que, em muitas aplicações usuais, métodos como Bishop simplificado produzem fatores de segurança muito próximos daqueles obtidos por métodos de equilíbrio geral, especialmente em taludes aproximadamente homogêneos e com superfícies de ruptura circulares, o que explica sua ampla adoção em manuais e softwares de engenharia. No entanto, para taludes com geometrias irregulares, presença de camadas de resistência muito contrastante ou ações não convencionais (por exemplo, sismos, empuxos adicionais, pressões não hidrostáticas), recomenda-se o uso de métodos mais rigorosos, pois diferenças entre as hipóteses sobre forças interfatias podem levar a fatores de segurança significativamente distintos (USACE, 2003; Ullah; Khan; Rehman, 2020).

Os softwares modernos de análise de estabilidade, como o SLOPE/W, implementam uma família completa de MEL (Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price, entre outros) e combinam esses métodos com estratégias automáticas de busca por superfícies críticas, permitindo comparar diferentes critérios em uma mesma seção de talude (*Geoslope International; Seequent, 2022*). O manual *Stability Modeling with SLOPE/W* destaca que, embora métodos simplificados ainda sejam úteis para fins de verificação e calibração, a prática atual em barragens tende a privilegiar métodos de equilíbrio geral como “estado da prática” para análises finais de projeto e revisões de segurança, especialmente quando acopladas a modelos de fluxo que fornecem distribuições realistas de poropressões (*Geoslope International; Seequent, 2022; USBR, 2019*).

3.7.2. Métodos numéricos e visão geral do GeoStudio (SEEP/W e SLOPE/W)

O avanço da capacidade computacional consolidou o uso de métodos numéricos na análise de estabilidade de taludes de barragens, especialmente para representar escoamento de água, distribuição de poropressões e resposta tensão-deformação em geometrias complexas. Em diretrizes recentes para modelagem de barragens de terra, o *Montana Department of Natural Resources and Conservation* registra que a abordagem hoje considerada “padrão de prática” em análises de percolação e estabilidade envolve o uso de modelos numéricos bidimensionais ou tridimensionais, baseados em elementos finitos, em substituição a métodos puramente gráficos ou

analógicos, desde que justificados e bem calibrados (Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021). Trabalhos aplicados mostram que, para barragens de terra, a combinação de análises de percolação e de estabilidade por meio de elementos finitos e métodos de equilíbrio limite permite reproduzir de forma mais realista as condições de campo, incluindo situações de carregamento transiente, como o rebaixamento rápido (Athani et al., 2015; Siacara et al., 2018).

No contexto dessa evolução, o SEEP/W é o módulo do GeoStudio dedicado à modelagem numérica de escoamento em meios porosos por meio do método dos elementos finitos. O manual *Seepage Modeling with SEEP/W – An Engineering Methodology* descreve a formulação de escoamento em solos saturados e não saturados, a partir das equações diferenciais de fluxo (baseadas na lei de Darcy), e sua aproximação numérica em malhas de elementos finitos, incluindo aspectos de integração temporal, matrizes de condutividade hidráulica e condições de contorno (Krahn, 2004). Segundo a documentação oficial da *Seequent*, o SEEP/W é um “software de elementos finitos para modelar o fluxo de água subterrânea em meios porosos”, capaz de simular tanto problemas saturados em regime permanente quanto análises saturadas/não saturadas transitórias, com acoplamento com a atmosfera na superfície do terreno (Seequent, 2024). Manuais de treinamento mostram seu uso em barragens de terra para definir geometrias complexas (zonas de núcleo, filtros, drenos e fundação), atribuir propriedades hidráulicas dependentes da sucção e configurar condições de contorno representativas (por exemplo, nível d’água no reservatório, drenagem no pé de jusante, recarga pluviométrica), resultando em campos de poropressão que podem ser exportados para análises de estabilidade (Hiben, 2019).

O SLOPE/W, por sua vez, é o módulo do GeoStudio destinado à análise da estabilidade de taludes por métodos de equilíbrio limite. A própria *Seequent* o apresenta como um “software líder em estabilidade de taludes por equilíbrio limite”, apto a analisar problemas simples e complexos em solos e rochas, considerando diferentes formas de superfícies de ruptura, condições de poropressão, propriedades de resistência e estados de carregamento (Seequent, 2024). O livro *Stability Modeling with SLOPE/W* detalha a implementação de diversos métodos de equilíbrio limite (Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price, entre outros), a definição de funções de resistência ao cisalhamento (incluindo critérios para solos não saturados) e o uso de fatores de segurança parciais, análises probabilísticas e estudos de sensibilidade (Geoslope International; Seequent, 2022). Materiais didáticos sobre o GeoStudio reforçam que,

em aplicações envolvendo barragens de terra, o SLOPE/W é utilizado para calcular fatores de segurança sob diferentes cenários de carregamento (fim de construção, cheia, rebaixamento rápido, sismo), empregando geometrias detalhadas e parâmetros geotécnicos compatíveis com a investigação de campo (Hiben, 2019).

Uma das principais vantagens do GeoStudio está na integração entre SEEP/W e SLOPE/W em um único ambiente de modelagem. A *Seequent* destaca que o GeoStudio 2D permite “incorporar facilmente resultados de elementos finitos em uma análise de equilíbrio limite para uma visão abrangente da estabilidade de taludes”, utilizando um único arquivo de projeto para múltiplas análises (Seequent, 2024). Em termos práticos, isso significa que uma análise de percolação realizada no SEEP/W (por exemplo, fluxo permanente com drenos ou rebaixamento transiente de reservatório) gera um campo de poropressões que pode ser diretamente lido pelo SLOPE/W para o cálculo do fator de segurança ao longo de superfícies de ruptura candidatas. Estudos de caso em barragens zonadas mostram o uso combinado de SEEP/W, SLOPE/W e SIGMA/W para avaliar, de forma integrada, o fluxo, a estabilidade e o estado de tensões em barragens de terra, considerando condições saturadas e não saturadas (Siacara et al., 2018). *Tech talks* e materiais institucionais sobre o “*GeoStudio Core*” reforçam essa filosofia de “um modelo, múltiplas análises”, na qual poropressões e tensões obtidas por elementos finitos alimentam análises de estabilidade por equilíbrio limite (Seequent, 2021).

Diretrizes técnicas recentes em segurança de barragens sugerem que a combinação de métodos numéricos (elementos finitos) e equilíbrio limite, em softwares como o GeoStudio, representa o estado atual da prática para estruturas críticas, desde que os modelos sejam calibrados e validados com dados de campo, instrumentação e análises manuais simplificadas (Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021). Ao mesmo tempo, esses documentos alertam que o aumento de sofisticação numérica não substitui a necessidade de modelos conceituais claros, verificação independente (por exemplo, por fluxogramas ou redes de fluxo) e análise crítica dos resultados. Assim, na análise de estabilidade de taludes aplicada à segurança de barragens, a utilização integrada de SEEP/W e SLOPE/W permite representar de forma mais realista o acoplamento entre percolação e resistência ao cisalhamento, mantendo, contudo, a necessidade de fundamentação geotécnica sólida e de julgamento de engenharia na interpretação dos fatores de segurança obtidos.

3.8. FATORES DE SEGURANÇA E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO

Do ponto de vista conceitual, o FS não é um valor universal, mas um alvo de projeto que deve ser compatível com as incertezas dos parâmetros geotécnicos, a qualidade das investigações, a representatividade do modelo numérico e, sobretudo, com as consequências de uma eventual ruptura. Duncan (2000) destaca que, em geotecnia, a grande variabilidade e a incerteza associadas aos parâmetros de resistência levam a intervalos de probabilidade de falha significativamente maiores do que em outras disciplinas estruturais, motivo pelo qual fatores de segurança relativamente elevados continuam sendo utilizados na prática corrente, mesmo diante do avanço dos métodos de confiabilidade. Nesse sentido, trabalhos recentes que relacionam confiabilidade e risco, como o de Schnaid et al. (2020), reforçam a necessidade de vincular o FS-alvo ao nível de esforço de engenharia (qualidade de dados, modelagem, controle construtivo) e ao potencial de perdas de vidas e danos socioambientais.

No contexto específico de barragens de terra e, em particular, de barragens de mineração, a norma NBR 13.028 (ABNT, 2017) estabelece fatores mínimos de segurança que se tornaram referência na prática brasileira. Trabalhos que discutem a aplicação da NBR 13.028, como o de Carneiro et al. (2023), reproduzem a Tabela 1 da norma para estabilidade física, na qual se definem, por exemplo, FS mínimos de 1,5 para taludes de jusante em operação com rede de fluxo em condição normal, 1,3 para superfícies entre bermas, 1,3 para operação em condição extrema com nível máximo do reservatório, 1,1 para operação com rebaixamento rápido do nível d'água atuando no talude de montante e 1,1 para condições sísmicas em maciço e fundações. Esses valores referem-se às superfícies de ruptura que condicionam a integridade global da estrutura, devendo ser alcançados independentemente do método de análise adotado.

Em paralelo às normas brasileiras, a literatura internacional vem propondo critérios de aceitação que combinam fatores de segurança mínimos com uma abordagem explicitamente baseada em risco. Schnaid, de Mello e Dzialoszynski (2020) compilaram diretrizes nacionais e internacionais para barragens de rejeito e, a partir de uma análise probabilística, recomendaram fatores de segurança mínimos na faixa de 1,5 a 1,8 para taludes permanentes, em função da combinação entre categoria de consequência e nível de esforço de engenharia. Nessa proposta, os autores estabelecem que para níveis de engenharia I e II o FS-alvo é de 1,5 independentemente da

consequência, enquanto para nível III os fatores recomendados são 1,5, 1,7 e 1,8, respectivamente, para as categorias A, B e C (crescentes em gravidade), evidenciando a tendência de exigir maiores margens de segurança à medida que aumentam a incerteza e o potencial de perdas de vidas humanas.

A Política Nacional de Segurança de Barragens e seus instrumentos regulamentares incorporam explicitamente os resultados das análises de estabilidade na avaliação global da segurança. No setor mineral, essa exigência é rigorosa e objetiva, uma vez que a Resolução ANM nº 95/2022 estabelece os fatores de segurança não apenas como diretrizes de engenharia, mas como parâmetros legais que definem os Níveis de Emergência da estrutura (ANM, 2022). Especificamente, o normativo determina em seu Art. 47 (inciso II, alínea e) que barragens de mineração com Fator de Segurança drenado situado entre 1,30 e 1,50 ($1,30 \leq FS < 1,50$) sejam automaticamente classificadas em Nível de Emergência 1 (NE1). Essa classificação impõe ao empreendedor a obrigação de executar ações corretivas imediatas e notificar os órgãos fiscalizadores, sob pena de embargo. Valores inferiores a esses patamares desencadeiam níveis de emergência ainda mais críticos (NE2 e NE3). Dessa forma, a regulação de mineração valida juridicamente o valor de 1,50, preconizado pela NBR 13.028 (ABNT, 2017), como o limiar de conformidade operacional, abaixo do qual a estrutura ingressa em estado de anormalidade técnica e legal. Diante desse conjunto de referências, observa-se a convergência para o valor de 1,50 como critério mandatório para condições estáticas de longo prazo, sob pena de enquadramento da estrutura em situações de emergência. No âmbito deste trabalho, esse limiar será adotado como critério de aceitação das análises numéricas da barragem fictícia, entendendo-se que resultados de FS inferiores a 1,50 indicam não apenas uma não conformidade normativa, mas uma condição de risco que exigiria o acionamento de protocolos de segurança.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA FICTÍCIA

A barragem analisada neste trabalho é fictícia, concebida para representar uma pequena barragem de acumulação de água, nos termos de guias nacionais e internacionais para *small dams*. Adota-se altura total de 10 m (da fundação ao coroamento), valor compatível com o enquadramento como pequena barragem segundo a ANA e o Banco Mundial, que diferenciam pequenas barragens de grandes estruturas com altura ≥ 15 m ou grande volume de armazenamento (ANA, 2016; *World Bank*, 2021). Essa escolha permite trabalhar com uma geometria representativa de muitos empreendimentos de usos múltiplos (irrigação, abastecimento local, dessedentação animal), sem reproduzir nenhum caso real específico.

A seção transversal é trapezoidal, com talude de montante 3H:1V, talude de jusante 2H:1V e largura de crista de 5 m. Esses valores são coerentes com as recomendações do *Manual on Small Earth Dams*, que indica taludes típicos da ordem de 1:3 em montante e 1:2 em jusante para barragens homogêneas, e sugere a equação (1) para dimensionamento da crista, o que, para $H = 10$ m, resulta em aproximadamente 5 m de largura (FAO, 2010). A largura adotada é suficiente para o tráfego de veículos leves e para inspeções de rotina, em consonância com o Guia Prático de Pequenas Barragens (ANA, 2016).

O maciço é considerado homogêneo em termos geotécnicos, constituído por um solo argiloso de baixa a média plasticidade, compactado em camadas, representando o uso de materiais locais finos, usual em pequenas barragens de terra (ANA, 2016; FAO, 2010). A fundação é assumida como um solo residual de baixa a média permeabilidade, sobre o qual se executa uma trincheira de vedação preenchida com o mesmo material argiloso compactado do maciço, solução amplamente indicada para reduzir o fluxo sob a barragem e alongar o caminho de percolação em pequenas estruturas (ANA, 2016). Para compatibilizar a escolha por um perfil homogêneo com requisitos mínimos de segurança, adota-se ainda um arranjo simples de drenagem interna em jusante (tapete drenante e dreno de pé), conforme configurações de barragem homogênea modificada descritas na literatura (FAO, 2010).

Quanto às condições de operação, considera-se um reservatório de usos múltiplos com um Nível Máximo Normal (NMN) posicionado 1,0 m abaixo da crista, garantindo borda livre compatível com as recomendações da FAO, que sugere, para pequenas barragens, folga mínima de 0,5 m e preferencialmente entre 0,75 m e 1,0 m (FAO, 2010). Admite-se ainda um Nível Máximo Maximorum em situação de cheia de projeto, sempre preservando borda livre suficiente para evitar galgamento, conforme critérios sintetizados pela ANA para dimensionamento de pequenas barragens (ANA, 2016). Essa caracterização geométrica, geotécnica e operacional fornece a base para os modelos de percolação e estabilidade desenvolvidos nos capítulos seguintes, mantendo o equilíbrio entre simplicidade conceitual e aderência às boas práticas de projeto para barragens de terra de pequeno porte.

4.1.1. Geometria e condições de contorno

A barragem fictícia é representada por uma seção transversal trapezoidal em aterro homogêneo, com altura total de 10 m, largura de crista de 5 m, talude de montante 3H:1V e talude de jusante 2H:1V. Tais valores são compatíveis com faixas recomendadas para pequenas barragens de terra homogêneas, nas quais se sugerem taludes da ordem de 1:3 em montante e 1:2 em jusante e larguras mínimas de crista entre 3 e 5 m, em função da altura do maciço e da necessidade de tráfego para inspeção (FAO, 2010; ANA, 2016). A jusante, considera-se um tapete drenante associado a um dreno de pé, configurando uma barragem homogênea modificada, solução usual para melhorar o rebaixamento da linha freática em pequenas barragens (FAO, 2010). A montante, o paramento em contato com o reservatório é assumido protegido contra erosão superficial, em linha com boas práticas para barragens de usos múltiplos (ANA, 2016).

Geotecnicamente, a fundação é idealizada como um solo residual relativamente homogêneo e pouco deformável, estendendo-se abaixo do eixo da barragem até profundidade suficiente para que a superfície inferior do domínio numérico se situe em região de pequenas variações de tensão e poropressão. O contato entre barragem e fundação é assumido como contínuo e aderente (sem deslizamento na interface), hipótese compatível com manuais de projeto de barragens de terra quando não há descontinuidades estruturais relevantes (USACE, 2004). Para controle de percolação, admite-se uma trincheira de vedação sob o eixo da barragem, escavada até horizonte menos permeável e recomposta com solo argiloso compactado, conforme

recomendado para pequenas barragens em solos residuais (ANA, 2016; FAO, 2010). As fronteiras laterais do modelo numérico são posicionadas a uma distância horizontal da ordem de várias vezes a altura da barragem, de modo a reduzir efeitos artificiais de borda sobre o regime de fluxo e as tensões (*Geoslope International; Sequent, 2022*).

Do ponto de vista hidráulico, o talude de montante é submetido a um nível d'água variável de acordo com o cenário analisado: (i) regime normal de operação, com Nível Máximo Normal (NMN) aproximadamente 1,0 m abaixo da crista; (ii) cheia de projeto, com nível máximo compatível com a borda livre mínima prescrita; e (iii) rebaixamento rápido, com redução brusca do nível do reservatório, mantendo poropressões internas elevadas. Nos modelos de fluxo, o reservatório é representado por contorno de carga hidráulica prescrita no paramento de montante, enquanto o talude de jusante combina uma condição de face de exfiltração com a presença do dreno de pé, representando o controle de percolação em regime permanente (Krahn, 2004; *Geoslope International; Sequent, 2022*). A base do domínio é assumida como praticamente impermeável e o topo, fora da área inundada, como superfície com pressão atmosférica.

4.1.2. Parâmetros geotécnicos adotados

A definição dos parâmetros geotécnicos para o solo de aterro da barragem fictícia foi baseada em estudos experimentais com solos lateríticos compactados, amplamente utilizados em barragens de terra no Brasil e em regiões tropicais. Trabalhos de Osinubi e Nwaiwu (2005), Lukiantchuki e Esquivel (2010) e Santos e Esquivel (2018) mostram que solos argilosos de baixa a média plasticidade, quando compactados com energias equivalentes aos ensaios Proctor, apresentam pesos específicos secos máximos típicos entre aproximadamente 16 e 19 kN/m³ e condutividades hidráulicas saturadas da ordem de 10⁻¹⁰ a 10⁻⁹ m/s, quando compactados próximos ou ligeiramente úmidos em relação ao teor de umidade ótimo. Adicionalmente, Oladejo e Ogunbode (2018), ao avaliarem o talude de uma barragem de terra em operação (Awba Dam, Nigéria), obtiveram coesões efetivas entre cerca de 2,2 e 5,0 kPa e ângulos de atrito efetivos entre 20° e 27°, valores compatíveis com solos argilosos compactados de uso corrente em barragens de terra. Diretrizes internacionais, como o *white paper* da *United States Society on Dams* (USSD, 2011), reforçam que materiais de núcleo argiloso em barragens de aterro devem combinar baixa

permeabilidade ($k \leq 10^{-9}$ m/s) com resistência ao cisalhamento adequada, obtida por meio de critérios de seleção e controle tecnológico rigorosos.

Com base nessas faixas documentadas, adota-se para o solo de aterro homogêneo um conjunto de parâmetros representativos, explicitando que se trata de uma escolha de engenharia dentro das faixas experimentais reportadas. Para o material principal do aterro (solo argiloso laterítico compactado), considera-se peso específico seco de referência $\gamma_d \approx 17,5$ kN/m³ e peso específico saturado $\gamma_{sat} \approx 19,0$ kN/m³, compatíveis com os valores máximos de 17 a 19 kN/m³ observados em solos lateríticos compactados por Osinubi e Nwaiwu (2005) e por Lukiantchuki e Esquivel (2010). Para os parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões efetivas, adota-se coesão efetiva $c' = 8$ kPa e ângulo de atrito efetivo $\phi' = 23^\circ$, valores posicionados dentro das faixas obtidas experimentalmente para misturas solo-bentonita (c' entre 5,9 e 22,1 kPa; ϕ' entre $11,3^\circ$ e $20,9^\circ$) e para o maciço de aterro da *Awba Dam* (c' entre 2,2 e 5,0 kPa; ϕ' médio entre 22° e 25°), representando um solo argiloso compactado de resistência moderada. Para a condutividade hidráulica saturada do aterro, adota-se $k_{sat} = 1 \times 10^{-9}$ m/s, coerente com o limite usual para barreiras argilosas ($k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s) reportado por Osinubi e Nwaiwu (2005) e por Lukiantchuki e Esquivel (2010).

No que se refere à fundação imediata da barragem, as referências consultadas enfatizam a importância do tratamento adequado da interface aterro e fundação e do controle da permeabilidade e resistência, mas não fornecem um conjunto único de parâmetros “típicos” que possa ser transposto diretamente para uma barragem fictícia sem inferências adicionais (USSD, 2011). Não tendo sido definida, neste trabalho, uma fundação específica correspondente a um caso real particular, e para evitar a adoção de valores não documentados na literatura, opta-se por uma hipótese simplificadora e explicitamente declarada: atribuir à camada de fundação superficial (horizonte residual imediatamente sob o aterro) os mesmos parâmetros de resistência e peso específico do aterro compactado, mantendo apenas uma permeabilidade ligeiramente maior (por exemplo, $k_{sat, fund} \approx 5 \times 10^{-9}$ m/s) para representar um solo menos rigorosamente compactado.

4.2. CONFIGURAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS NO GEOSTUDIO

A modelagem numérica foi realizada no conjunto GeoStudio, utilizando-se SEEP/W para a análise de percolação e SLOPE/W para a análise de estabilidade de taludes. A geometria da

barragem fictícia foi desenhada em um único arquivo de projeto, com a seção transversal descrita no item 4.1.1, seguindo a filosofia de “um modelo, múltiplas análises” recomendada pela própria documentação do GeoStudio (Seequent, 2022; Geoslope International; Seequent, 2022). O domínio do modelo foi estendido lateralmente e em profundidade de forma a minimizar efeitos de borda sobre o campo de poropressões e de tensões, conforme orientações gerais de modelagens bidimensionais para barragens de terra (Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021).

No SEEP/W, o problema foi formulado em 2D, em regime estacionário para as condições de operação normal e de cheia de projeto, e em regime transiente para o cenário de rebaixamento rápido. Foram atribuídas propriedades hidráulicas ao aterro homogêneo e à fundação conforme o item 4.1.2, adotando-se condutividade hidráulica saturada constante e, quando pertinente, função $k(\psi)$ simplificada para solos não saturados, como proposto no manual de SEEP/W (Krahn, 2004). As condições de contorno incluíram: carga hidráulica prescrita no talude de montante (níveis de reservatório), condição de fluxo nulo na base do domínio, fronteiras laterais suficientemente afastadas e condição de exfiltração/jusante drenante no pé da barragem, de acordo com o arranjo de drenagem adotado. A malha de elementos finitos foi refinada na região da barragem e da interface barragem e fundação, seguindo as recomendações de densidade de malha próximas às zonas de maior gradiente hidráulico (Krahn, 2004; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021).

No SLOPE/W, foram utilizados métodos de equilíbrio limite para avaliar a estabilidade global dos taludes, com a mesma geometria e estratigrafia do modelo de percolação. Os parâmetros de resistência (c' , ϕ' , γ) do aterro e da fundação foram definidos conforme o item 4.1.2. A análise considerou superfícies potenciais de ruptura circulares e não circulares, com busca automática conduzida por algoritmos internos do software, em linha com os procedimentos descritos no manual *Stability Modeling with SLOPE/W* (Geoslope International; Seequent, 2022). Em cada cenário, o campo de poropressões calculado previamente no SEEP/W foi importado para o SLOPE/W como condição hidráulica, de modo a garantir consistência entre a análise de fluxo e a análise de estabilidade, conforme recomendado em guias de boas práticas para barragens de terra (USBR, 2019; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021).

Por fim, foram configurados cenários de carregamento distintos: (i) fim de construção/longa duração com regime de fluxo permanente; (ii) operação em nível máximo

normal; (iii) cheia de projeto; e (iv) rebaixamento rápido do reservatório. Para cada cenário, definiu-se um conjunto coerente de condições de contorno hidráulicas no SEEP/W e, em seguida, as respectivas análises de estabilidade no SLOPE/W, com cálculo do fator de segurança por métodos de equilíbrio limite de referência, em conformidade com a prática recomendada em manuais de estabilidade de taludes de barragens (USACE, 2003; *Geoslope International; Seequent*, 2022).

4.2.1. Modelagem do regime de percolação no SEEP/W

A modelagem do regime de percolação foi realizada em 2D, utilizando a seção transversal da barragem descrita no item 4.1.1. O domínio numérico abrange o maciço de aterro e uma porção da fundação, estendendo-se lateralmente a várias vezes a altura da barragem e em profundidade até uma cota em que variações de poropressão e gradiente hidráulico sejam pouco significativas, em conformidade com as recomendações de modelagem de fluxo em barragens de terra (Krahn, 2004; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021). A geometria foi discretizada em elementos finitos triangulares, com malha refinada na região da barragem, na interface barragem e fundação, na trincheira de vedação e junto ao tapete drenante, mantendo malha mais grosseira nas regiões afastadas, como sugerido nos manuais do SEEP/W (Krahn, 2004).

As condições de contorno hidráulicas foram definidas para representar os cenários de operação analisados. No talude de montante, o reservatório foi modelado como contorno de carga total prescrita, com diferentes níveis d'água (operação normal, cheia de projeto e rebaixamento rápido). No talude de jusante, adotou-se uma combinação de face de exfiltração (superfície livre automática) e contorno de pressão nula associado ao dreno de pé, representando drenagem eficiente do flanco de jusante (Krahn, 2004; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021). A base do domínio foi considerada como fronteira de fluxo nulo (impermeável) e as fronteiras laterais foram posicionadas suficientemente afastadas, também com fluxo nulo, de forma a não interferir no regime de percolação próximo à barragem (*Geoslope International; Seequent*, 2022).

As propriedades hidráulicas foram atribuídas a partir dos parâmetros definidos no item 4.1.2. Para o aterro, adotou-se condutividade hidráulica saturada isotrópica da ordem de 10^{-9} m/s, compatível com solos argilosos compactados utilizados como barreiras hidráulicas em barragens de terra (Osinubi; Nwaiwu, 2005; Lukiantchuki; Esquivel, 2010). Para a fundação imediata,

manteve-se o padrão de resistência, com condutividade saturada ligeiramente maior para representar um solo menos compactado. Nos cenários de análise em regime permanente (operação normal e cheia), o SEEP/W foi configurado para resolver a equação de fluxo estacionário até convergência do campo de poropressões. No cenário de rebaixamento rápido, foi empregada análise transitória, com redução gradativa do nível do reservatório ao longo de um intervalo de tempo definido e cálculo passo a passo das poropressões internas, conforme metodologia descrita por Krahn (2004) e pelas diretrizes para modelagem de rebaixamento em barragens de terra (Krahn, 2004; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021). Os campos de poropressões resultantes de cada cenário foram posteriormente exportados para o SLOPE/W para as análises de estabilidade de taludes.

4.2.2. Modelagem da estabilidade de taludes no SLOPE/W

A análise de estabilidade foi conduzida no SLOPE/W, utilizando a mesma geometria e estratigrafia adotadas no SEEP/W. Em cada cenário, o campo de poropressões calculado no SEEP/W foi importado para o SLOPE/W como *pore-water pressure grid*, substituindo hipóteses simplificadas de linha freática por um campo hidráulico obtido por elementos finitos. Essa abordagem segue a metodologia descrita nos manuais do GeoStudio, que recomendam o uso direto das poropressões calculadas em SEEP/W para garantir consistência entre a análise de fluxo e a análise de estabilidade (Krahn, 2004; Geoslope International; Seequent, 2022).

Foram empregados métodos de equilíbrio limite amplamente aceitos na prática: o método de Bishop simplificado, representativo de métodos com equilíbrio de momentos em superfícies circulares, e o método de Spencer, que satisfaz simultaneamente o equilíbrio de forças e de momentos e é classificado como método de equilíbrio geral (USACE, 2003; Duncan; Wright; Brandon, 2014). A adoção de dois métodos permite comparar fatores de segurança obtidos por um procedimento clássico e por um procedimento mais rigoroso, em linha com a recomendação do EM 1110-2-1902 para análises de taludes em barragens de terra (USACE, 2003). A resistência ao cisalhamento foi modelada segundo o critério de Mohr-Coulomb, com parâmetros efetivos c' e ϕ' definidos no item 4.1.2, de acordo com a abordagem de resistência drenada em problemas de estabilidade de longo prazo (Duncan; Wright; Brandon, 2014).

As superfícies potenciais de ruptura foram definidas por meio de rotinas de busca automática do SLOPE/W. Para o talude de jusante, utilizou-se um campo de busca que abrange desde o pé do talude até a crista, permitindo tanto superfícies circulares quanto não circulares, com pontos de entrada e saída definidos em faixas compatíveis com a geometria da barragem. Para o talude de montante, em cenários de rebaixamento rápido, a região de busca foi posicionada de forma a capturar superfícies que interceptam o paramento de montante e a zona mais saturada do maciço, conforme sugerido em diretrizes para avaliação de estabilidade sob rebaixamento (USBR, 2019; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021). Em todos os casos, o fator de segurança foi calculado em condições drenadas de longo prazo (parâmetros efetivos) para operação normal e cheia, e, no cenário de rebaixamento rápido, com poropressões transientes importadas do SEEP/W, mantendo ainda uma formulação em tensões efetivas, conforme prática recomendada para barragens de terra quando se dispõe de análise de fluxo transitória (USBR, 2019; *Geoslope International; Sequent*, 2022).

4.3. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a barragem de terra homogênea fictícia adotada neste trabalho, foram definidos quatro cenários de análise de estabilidade, buscando representar situações típicas observadas em barragens reais e em conformidade com recomendações de manuais e diretrizes internacionais (USACE, 2003; USBR, 2019). A ideia é cobrir tanto condições de operação rotineira quanto estados de carregamento mais desfavoráveis, associados a cheias e variações rápidas de nível d'água, que são reconhecidamente críticos para taludes de barragens de terra (USBR, 2019; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021).

O Cenário 1: Operação em Nível Máximo Normal (NMN) representa a condição de rotina da barragem, com o reservatório operando no nível máximo normal definido no item 4.1 (aproximadamente 1,0 m abaixo da crista). Trata-se de um estado de fluxo permanente, com regime de poropressões estabilizado no maciço, condição diretamente relacionada ao desempenho de longo prazo e à verificação dos fatores de segurança estáticos do talude de jusante (USACE, 2003; ANA, 2016). Em manuais de estabilidade de taludes, essa situação é considerada a principal base para definição de fatores de segurança mínimos sob carregamento

estático, já que corresponde ao modo de operação predominante ao longo da vida útil da barragem (USACE, 2003; Duncan; Wright; Brandon, 2014).

O Cenário 2: Cheia de Projeto representa uma condição de elevação do nível de água no reservatório até o Nível Máximo Maximorum, associado à cheia de projeto hidrológica, ainda com a crista preservando borda livre suficiente para evitar galgamento. Essa condição implica aumento da carga hidráulica sobre o paramento de montante e elevação das poropressões internas, podendo reduzir o fator de segurança especialmente em regiões próximas ao núcleo e à fundação (USBR, 2019). Diretrizes de segurança de barragens recomendam avaliar a estabilidade em níveis de água máximos de projeto, uma vez que cheias extremas estão entre as principais causas históricas de ruptura por galgamento e instabilidade de taludes (ICOLD, 2016; USBR, 2019).

O Cenário 3: Rebaixamento Rápido do Reservatório em Montante traduz uma situação crítica recorrente em diretrizes e estudos de caso: o nível de água no reservatório é reduzido em intervalo relativamente curto, enquanto o maciço permanece com poropressões internas elevadas (Duncan; Wright; Brandon, 2014; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021). Nesse cenário, o talude de montante perde o empuxo estabilizador da água e passa a estar sujeito a gradientes hidráulicos desfavoráveis, o que pode levar a fatores de segurança significativamente menores em comparação com a operação em regime permanente (USACE, 2003; USBR, 2019). A literatura de estabilidade de barragens de terra destaca o rebaixamento rápido como um dos estados de carregamento mais severos para o talude de montante, sendo frequentemente associado a instabilidades em taludes de reservatórios (Duncan; Wright; Brandon, 2014; USBR, 2019).

O Cenário 4: Condição de Longo Prazo com Rebaixamento Natural corresponde à situação em que, após o rebaixamento do reservatório, o maciço tem tempo suficiente para dissipar poropressões e ajustar seu regime de percolação a um novo nível de água mais baixo. Trata-se, essencialmente, de uma condição drenada de longo prazo, em que o talude de montante é verificado com o nível de água rebaixado e com poropressões internas menores do que no rebaixamento rápido. Esse cenário é relevante para avaliar a estabilidade residual da barragem após eventos de rebaixamento ou secas prolongadas e é compatível com a abordagem discutida nas diretrizes de boas práticas para análise de risco em barragens de aterro (USBR, 2019).

Em conjunto, esses quatro cenários cobrem: (i) operação normal; (ii) carregamento máximo por cheia; (iii) condição transitória severa de rebaixamento rápido; e (iv) situação drenada de longo prazo pós-rebaixamento. A seleção está alinhada à prática recomendada por manuais de projeto e de segurança de barragens de terra, que indicam a necessidade de considerar, no mínimo, condições de operação normal, nível máximo e rebaixamento rápido, ajustando os critérios de fator de segurança em função de cada estado de carregamento (USACE, 2003; USBR, 2019; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021).

4.3.1. Condições de nível d'água (normal, máximo operacional, maximorum)

Para a barragem fictícia adotada neste trabalho, consideram-se três níveis característicos de operação do reservatório: nível de água normal, nível máximo operacional e nível maximorum. Em manuais e guias de projeto, o nível de água normal (ou nível máximo normal) corresponde ao nível de reservatório associado à operação rotineira, geralmente controlado por vertedouro em regime de escoamento livre, enquanto o nível máximo operacional está ligado a manobras de operação em cheias moderadas, ainda sem utilização de toda a borda livre disponível (ANA, 2016; FAO, 2010). Já o nível maximorum está associado à cheia de projeto, representando a cota máxima que a superfície livre pode atingir em eventos extremos, sem que ocorra galgamento da crista, desde que respeitada a borda livre mínima de segurança (ANA, 2016; ICOLD, 2016).

Neste estudo, define-se o nível normal como aquele cuja superfície livre se encontra aproximadamente 1,0 m abaixo da crista, coerente com a recomendação de borda livre mínima entre 0,5 e 1,0 m para pequenas barragens de terra (FAO, 2010). O nível máximo operacional é tomado ligeiramente acima do nível normal, ainda respeitando borda livre suficiente para atender às orientações de segurança contra galgamento e efeitos de ondas, sendo usado para simular situações de operação com reservatório mais cheio, mas ainda dentro da faixa de controle rotineiro (ANA, 2016). O nível maximorum corresponde ao nível de cheia de projeto, adotado aqui como a superfície livre mais elevada possível sem violar a borda livre mínima especificada para a barragem, em concordância com a prática de projeto que relaciona o dimensionamento do vertedouro à cheia de projeto e ao volume de amortecimento do reservatório (ANA, 2016; *World Bank*, 2021).

No modelo de percolação em SEEP/W, essas três condições de nível d'água são representadas por contornos de carga hidráulica prescrita na face de montante, com cada cenário assumindo uma cota distinta da superfície livre. O aumento do nível de água (do normal para o máximo operacional e para o maximorum) resulta em maior carga hidráulica sobre o paramento de montante, elevação da linha freática interna e incremento das poropressões no maciço e na fundação, efeitos que são captados pelos campos de poropressões calculados em regime permanente (Krahn, 2004). Na análise de estabilidade em SLOPE/W, esses campos de poropressões são utilizados diretamente no cálculo dos fatores de segurança, de modo que níveis mais elevados do reservatório tendem a reduzir a estabilidade dos taludes, sobretudo o de jusante, ao aumentar as pressões neutras e diminuir as tensões efetivas resistentes (USACE, 2003; USBR, 2019).

4.3.2. Condições de rebaixamento lento e rápido

Neste trabalho, distinguem-se conceitualmente rebaixamento lento e rebaixamento rápido do reservatório. De forma geral, considera-se rebaixamento lento aquele em que a redução do nível d'água ocorre em ritmo suficientemente baixo para que as poropressões no maciço acompanhem a variação do carregamento, permitindo que o sistema atinja sucessivos estados de regime quase permanente (Alonso, 2010; USBR, 2019). Já o rebaixamento rápido é definido como a situação em que o nível do reservatório é reduzido tão depressa que as poropressões em parte ou em todo o aterro não conseguem entrar em equilíbrio com o novo nível d'água, permanecendo elevadas mesmo após a queda do espelho d'água (Duncan; Wright; Brandon, 2014; ASDSO, 2017). Não há um limite único de taxa de rebaixamento aceito universalmente, mas estudos sobre taludes submersos apontam que taxas mais altas (ordem de dezenas de centímetros por dia ou mais) tendem a caracterizar condições de *drawdown* potencialmente críticas (Alonso, 2010).

No modelo numérico adotado, o rebaixamento lento é representado pelo Cenário 4 – condição de longo prazo pós-rebaixamento, em que se supõe que o reservatório já foi baixado a uma cota inferior e que o campo de poropressões evoluiu até um novo regime permanente compatível com esse nível. Em termos de SEEP/W, isso corresponde à solução estacionária do fluxo com o nível d'água reduzido, gerando um campo de poropressões equilibrado que é

exportado para o SLOPE/W como contorno hidráulico para a análise de estabilidade drenada de longo prazo (Krahn, 2004; *GeoSlope International*; *Sequent*, 2022). O rebaixamento rápido, por sua vez, é representado pelo Cenário 3 – rebaixamento rápido em montante, em que o nível do reservatório é reduzido em um intervalo de tempo relativamente curto em uma análise transitória de percolação. O SEEP/W é configurado para simular a queda do nível de montante passo a passo, enquanto as poropressões internas se dissipam de forma retardada; ao final do período de rebaixamento, o campo transiente de poropressões é capturado e transferido ao SLOPE/W para o cálculo do fator de segurança sob condição hidráulicamente não equilibrada (Krahn, 2004; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021; *GeoSlope International*; *Sequent*, 2022).

Essas condições são particularmente críticas para o talude de montante. Em operação normal, a água no reservatório exerce um empuxo estabilizador no paramento de montante; durante o rebaixamento rápido, esse empuxo é reduzido ou eliminado quase instantaneamente, enquanto as poropressões internas no maciço permanecem elevadas, reduzindo as tensões efetivas e, portanto, a resistência ao cisalhamento disponível (USACE, 2003; USBR, 2019). Como consequência, o fator de segurança do talude de montante tende a ser mínimo logo após o rebaixamento, situação amplamente documentada em manuais de estabilidade de taludes e em estudos de casos e de *back-analysis* de rupturas associadas ao *drawdown* (Duncan; Wright; Brandon, 2014; Vandenberge, 2014; Kim et al., 2023). O rebaixamento lento, por outro lado, permite que as poropressões se ajustem gradualmente ao novo nível d'água, reduzindo o desbalanceamento entre o carregamento hidráulico externo e o estado interno de tensões e, em geral, conduzindo a fatores de segurança mais elevados no talude de montante.

4.3.3. Configurações com e sem filtro de drenagem

Neste trabalho são consideradas duas configurações estruturais para a barragem fictícia: (i) seção homogênea sem filtro interno/drenos e (ii) seção homogênea modificada com filtro e dreno de jusante. Na configuração sem filtro, o maciço é constituído apenas pelo solo de aterro homogêneo apoiado sobre a fundação, de forma análoga às barragens de terra simples descritas em guias para pequenas barragens (ANA, 2016; FAO, 2010). Nessa condição, a linha freática tende a emergir mais próxima ao talude de jusante e as poropressões internas permanecem relativamente elevadas em boa parte do maciço, uma vez que não há um meio drenante interno

específico para coletar e conduzir a água percolada (USB, 2019). Já na configuração com filtro de drenagem, admite-se a presença de um tapete drenante e de um dreno de pé na zona de jusante, eventualmente associado a um filtro-chaminé, conforme configurações típicas de “barragem homogênea modificada” descritas em manuais de projeto (FAO, 2010; USSD, 2011).

Do ponto de vista geotécnico, a inclusão de filtros e drenos tem dois efeitos principais sobre o regime de percolação: (i) rebaixar e “puxar” a linha freática para dentro do corpo drenante, reduzindo poropressões no talude de jusante, e (ii) prover um caminho seguro para a água percolada, limitando gradientes hidráulicos excessivos e mitigando riscos de erosão interna e surgências descontroladas (USB, 2019; USSD, 2011). Ao reduzir as pressões neutras na zona de jusante, aumenta-se a parcela de tensões efetivas mobilizável para resistência ao cisalhamento, o que tende a elevar o fator de segurança do talude de jusante em condições de operação normal e de cheias, como destacado nas recomendações de filtros e drenos em barragens de terra (USB, 2019; Heitland; Donaghy; Montana DNRC, 2021). Em contrapartida, na configuração sem filtro, espera-se uma linha freática mais alta e maior extensão de regiões saturadas, o que pode resultar em menores fatores de segurança e maior sensibilidade a variações de nível d’água e a processos de deterioração ao longo do tempo (ANA, 2016; USB, 2019). A comparação entre essas duas configurações, nas modelagens de percolação e estabilidade, permite avaliar quantitativamente o efeito benéfico do sistema de drenagem interna na segurança global da barragem.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da modelagem numérica computacional desenvolvida no software GeoStudio 2018 R2. A metodologia adotada integrou a análise de fluxo e percolação, simulada via método dos elementos finitos (módulo SEEP/W), com a avaliação da estabilidade de taludes pelo método de equilíbrio limite (módulo SLOPE/W), utilizando o método rigoroso de Morgenstern-Price. Essa abordagem acoplada permitiu determinar as distribuições de poropressão no interior do maciço e os respectivos Fatores de Segurança (FS) para as superfícies de ruptura críticas.

As simulações foram estruturadas para abranger os cenários mais representativos da vida útil da barragem, contemplando condições de regime permanente, Nível Máximo Normal e Nível Máximo Maximorum (Cheia), e condições de regime transiente, especificamente os casos de rebaixamento rápido e lento do reservatório. Adicionalmente, realizou-se uma análise comparativa sensível para verificar a eficácia do sistema de drenagem interna, contrastando o comportamento da estrutura com o filtro operante versus um cenário hipotético de falha por colmatação.

A discussão dos dados fundamenta-se na comparação dos Fatores de Segurança calculados com os critérios mínimos de aceitação recomendados pelas normas técnicas pertinentes, com destaque para a NBR 13.028 e diretrizes internacionais como as do USACE. Para além da verificação numérica, os resultados são interpretados sob a ótica dos mecanismos físicos atuantes, correlacionando a variação das tensões efetivas e a posição da linha freática com a estabilidade global e a segurança hidráulica da estrutura.

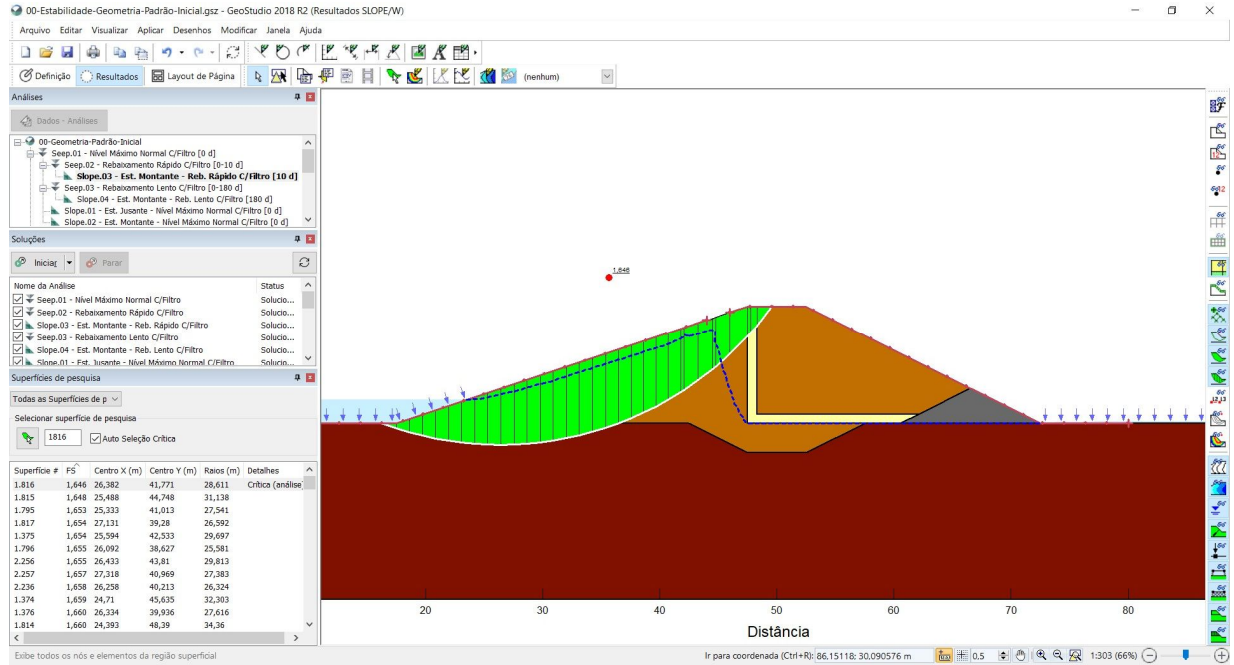
5.1. RESULTADOS DE ESTABILIDADE DE TALUDES

5.1.1. Talude de montante

A estabilidade do talude de montante foi avaliada considerando a variação do nível do reservatório, partindo da condição de Nível Máximo Normal até o esvaziamento total. Na condição inicial de reservatório cheio, o Fator de Segurança (FS) apresenta valores elevados (superiores a 3,0), uma vez que a massa de água atua exercendo uma pressão hidrostática contra o paramento, funcionando como um contrapeso estabilizador que aumenta as tensões normais e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do solo na interface solo-água.

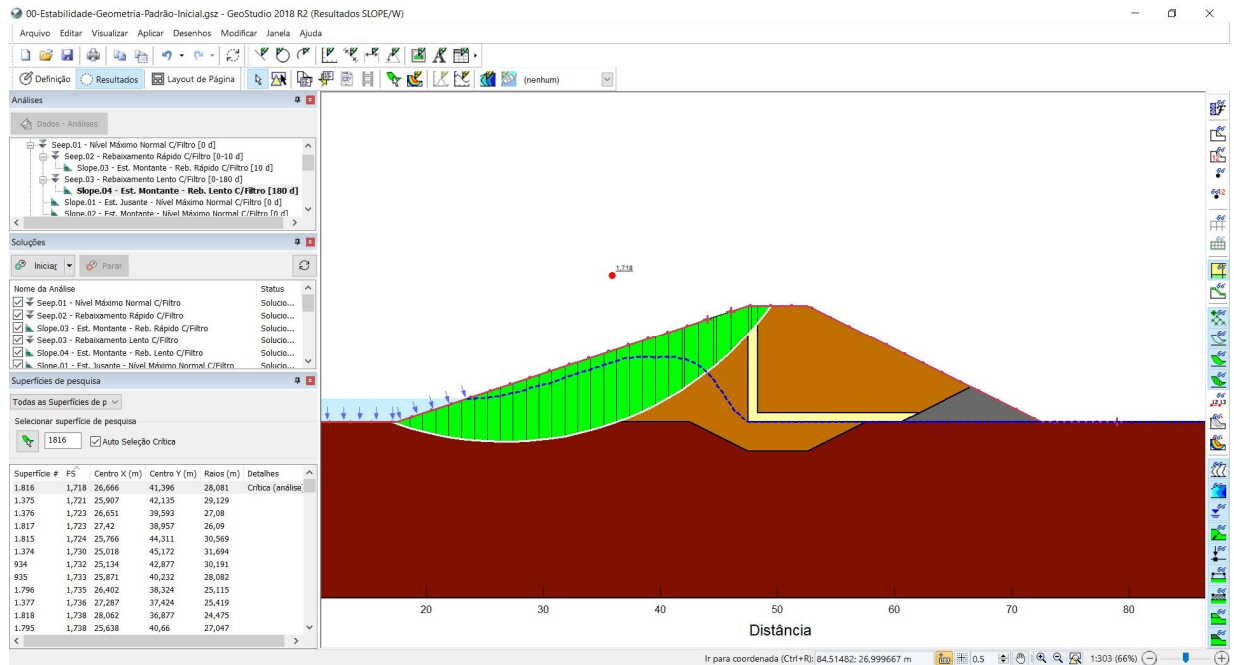
Entretanto, o cenário crítico para este talude ocorre durante o rebaixamento do nível d'água. As simulações demonstraram que, ao remover o suporte externo da água, as poropressões no interior do maciço argiloso (cuja permeabilidade é baixa, $k = 10^{-9}$ m/s) não se dissipam na mesma velocidade, gerando um desequilíbrio momentâneo. Apesar disso, o FS mínimo obtido para o rebaixamento rápido foi de 1,646. Este valor satisfatório deve-se à geometria conservadora adotada para o talude de montante (inclinação 1V:3H) e à presença de coesão efetiva ($c'=8$ kPa), que garantiram a integridade da estrutura mesmo sob condições transientes severas.

Figura 3: Estabilidade do talude de montante: rebaixamento rápido com filtro (10d).



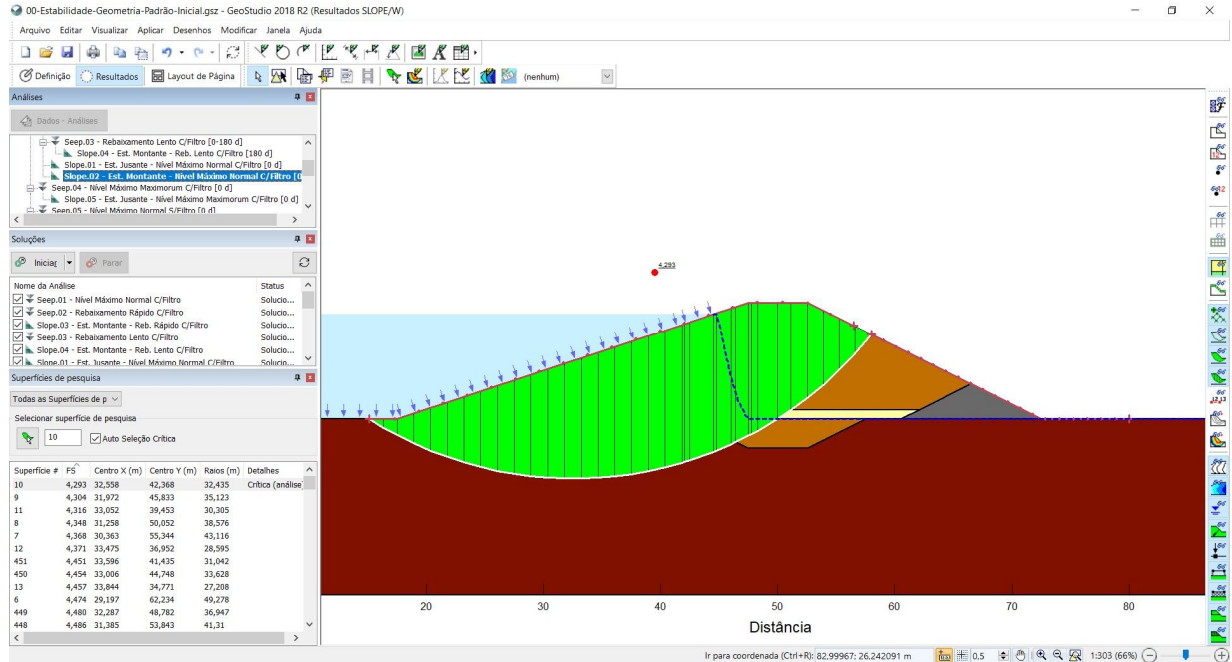
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 4: Estabilidade do talude de montante: rebaixamento lento com filtro (180 d).



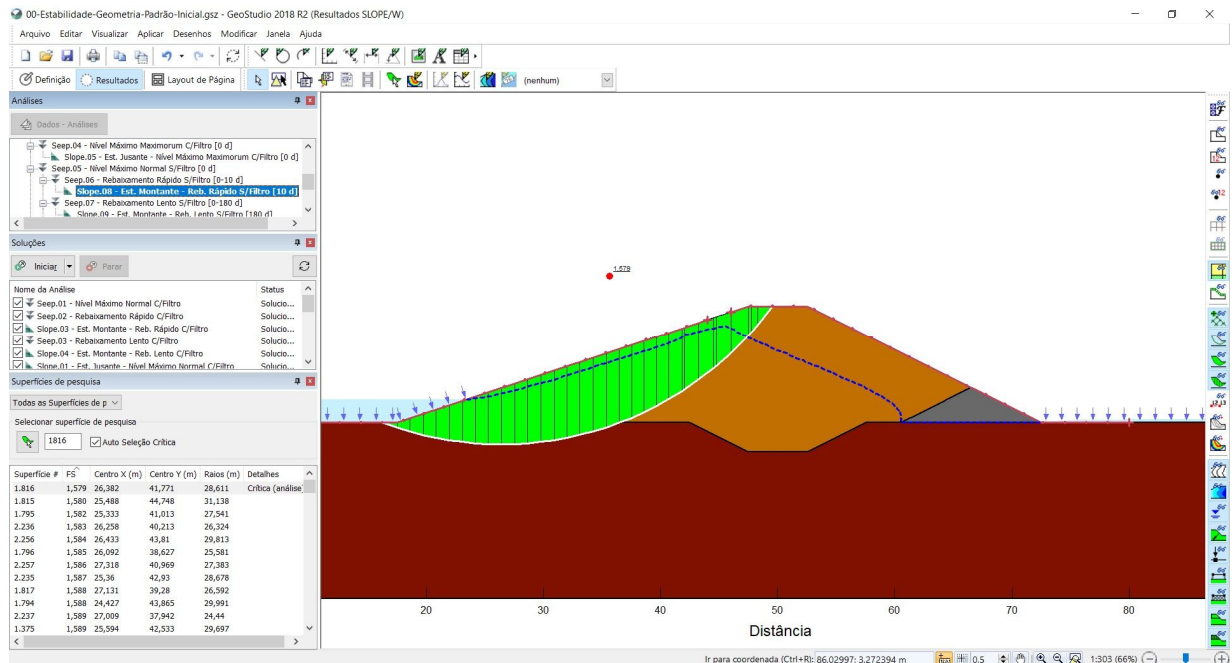
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 5: Estabilidade do talude de montante: nível máximo normal com filtro.



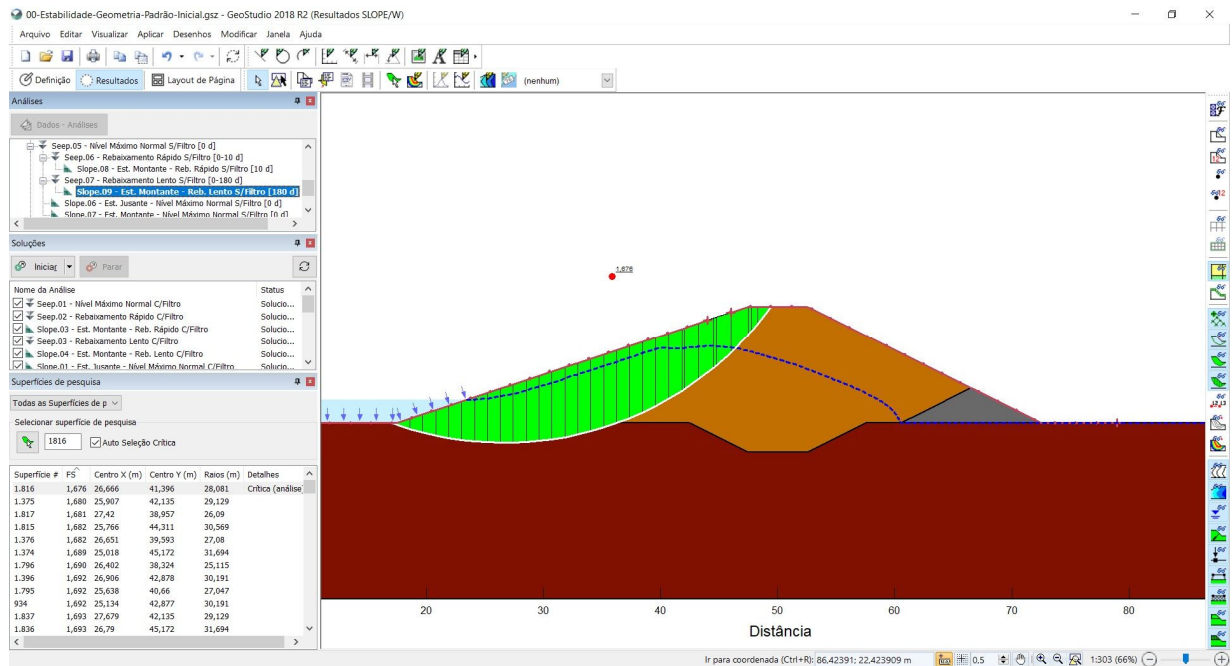
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 6: Estabilidade do talude de montante: rebaixamento rápido sem filtro (10d).



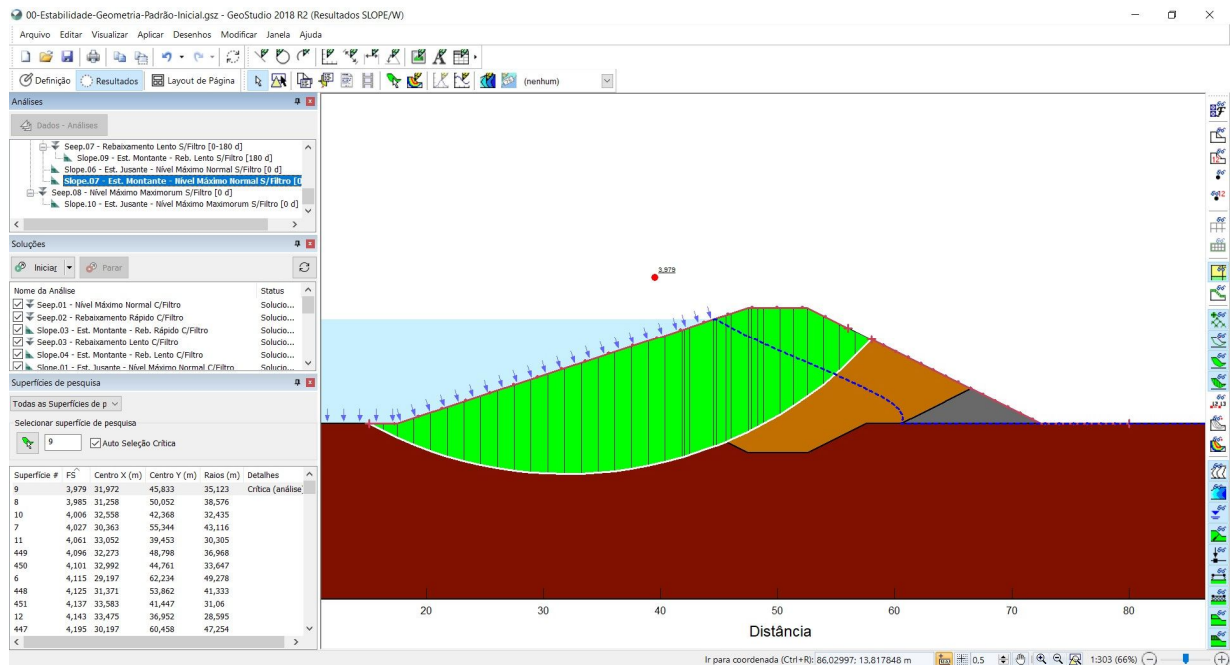
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 7: Estabilidade do talude de montante: rebaixamento lento sem filtro (180d).



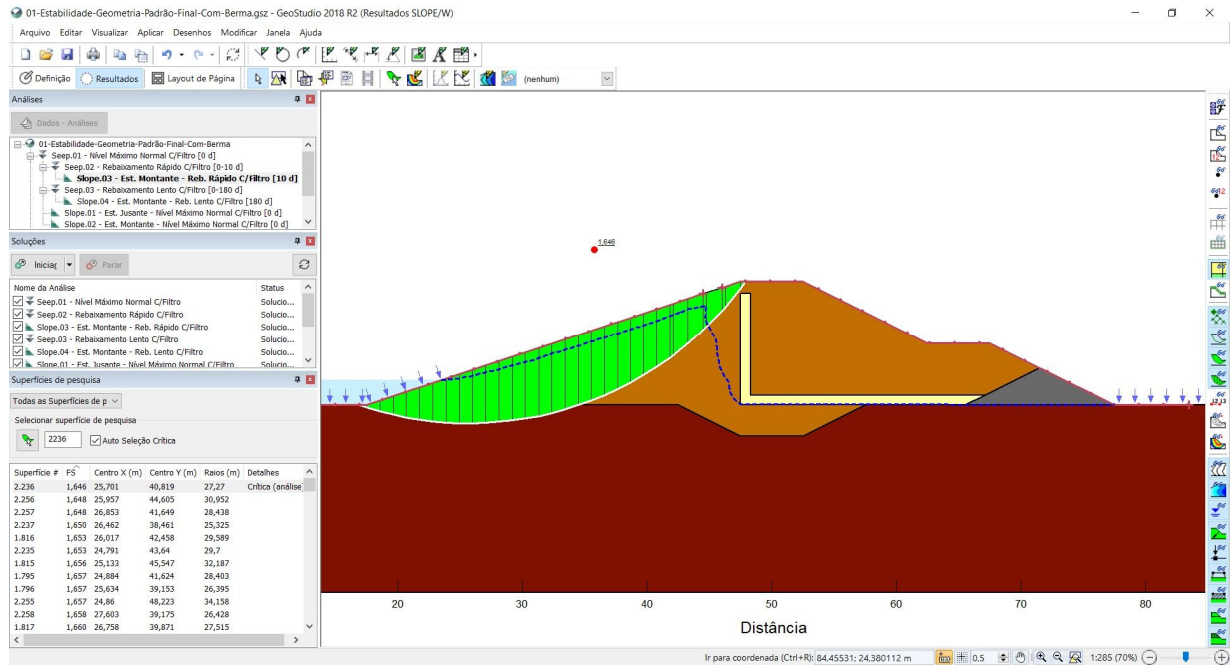
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 8: Estabilidade do talude de montante: nível máximo normal sem filtro.



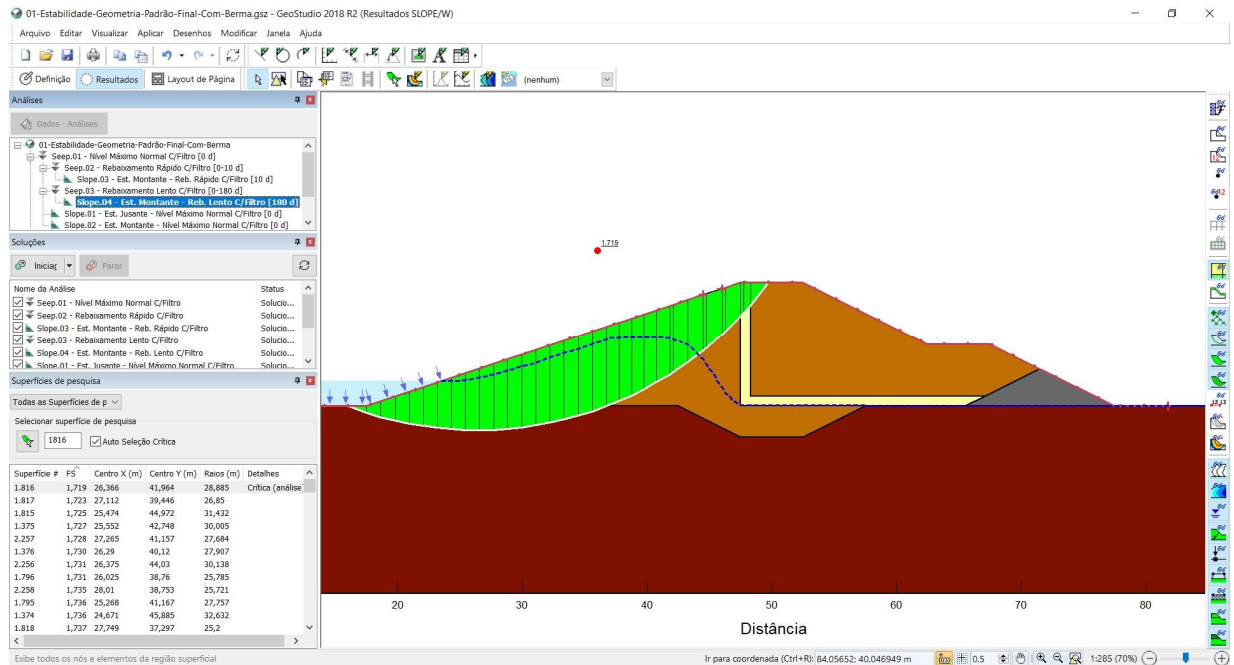
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 9: Estabilidade do talude de montante com berm: rebaixamento rápido com filtro (10d).



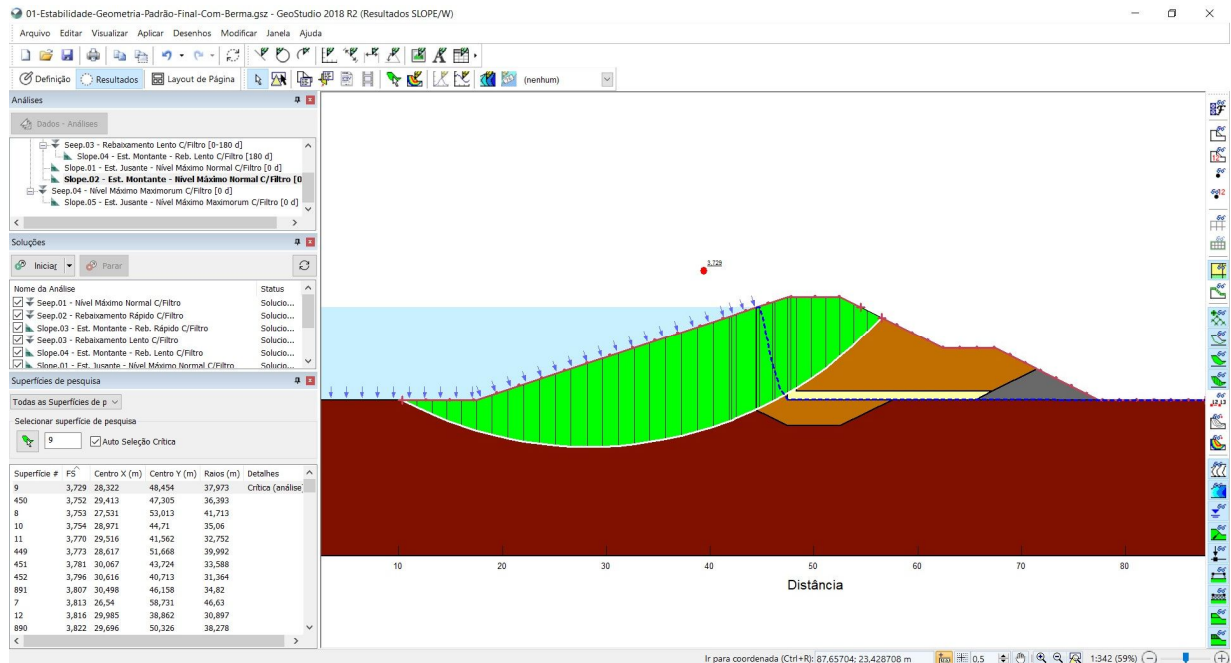
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 10: Estabilidade do talude de montante com berma: rebaixamento lento com filtro (180d).



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 11: Estabilidade do talude de montante com berma: nível máximo normal com filtro.



Fonte: Próprio autor, 2025.

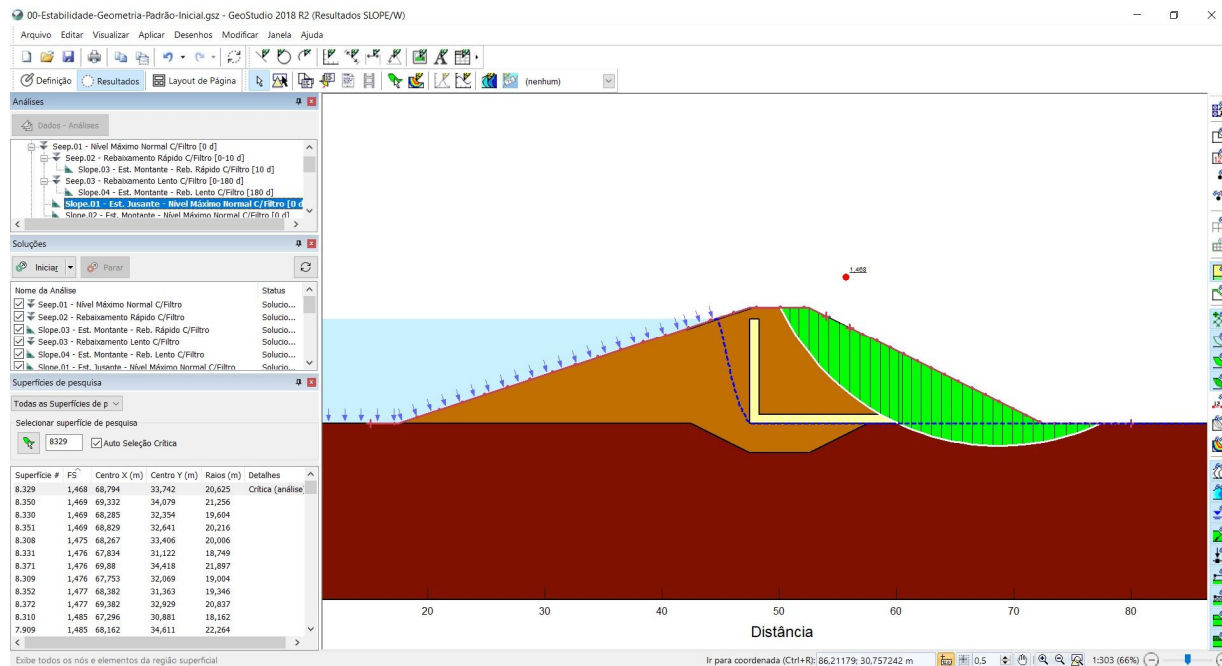
5.1.2. Talude de jusante

Para o talude de jusante, a análise focou no regime de fluxo permanente (steady-state) sob Nível Máximo Normal, situação que perdura pela maior parte da vida útil da obra. A superfície de ruptura crítica identificada pelo método de Morgenstern-Price tangencia a crista e mobiliza a massa de solo em direção ao pé da barragem, resultando em um Fator de Segurança de 1,468. A posição da linha freática, rebaixada pelo sistema de drenagem, manteve a maior parte da superfície de deslizamento em zona não saturada, contribuindo para a resistência mobilizada.

Apesar de indicar estabilidade global ($FS > 1,0$), o resultado obtido encontra-se no limiar dos critérios de aceitação para obras de longa duração. A geometria mais íngreme deste talude (1V:2H), comparada à de montante, torna-o mais sensível às condições de carregamento. O valor de 1,468 evidencia que a margem de segurança contra incertezas geotécnicas é estreita,

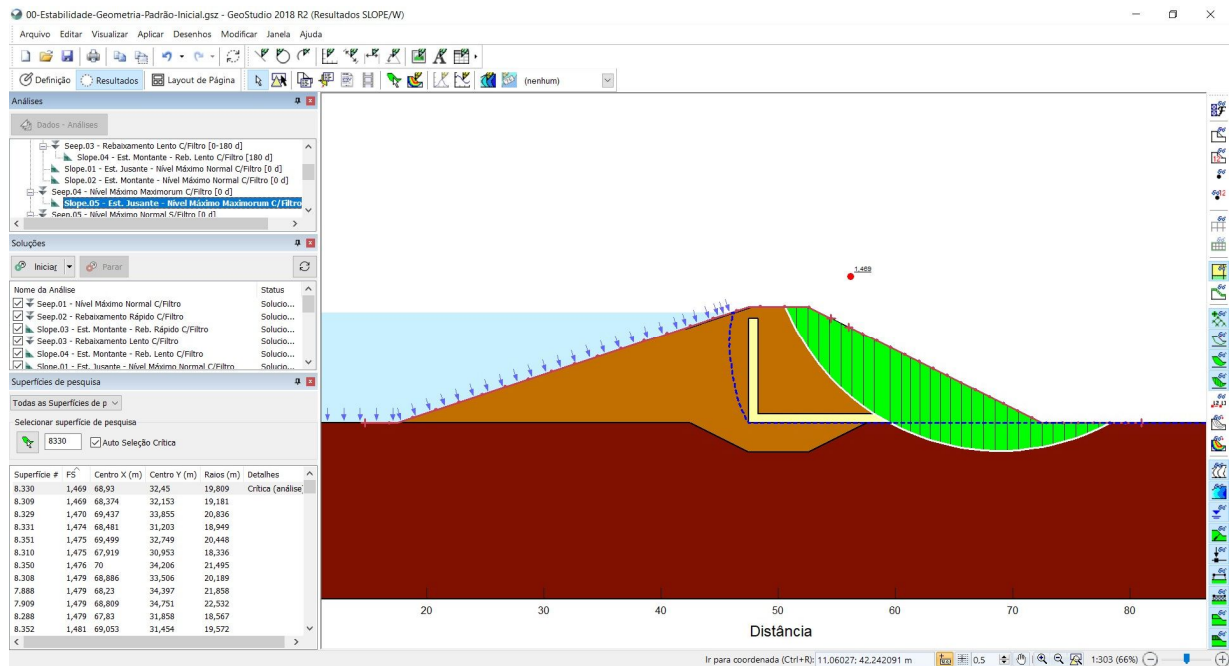
classificando a estrutura em um estado de atenção que pode demandar medidas de reforço ou monitoramento rigoroso para garantir a conformidade normativa a longo prazo.

Figura 12: Estabilidade do talude de jusante: nível máximo normal com filtro.



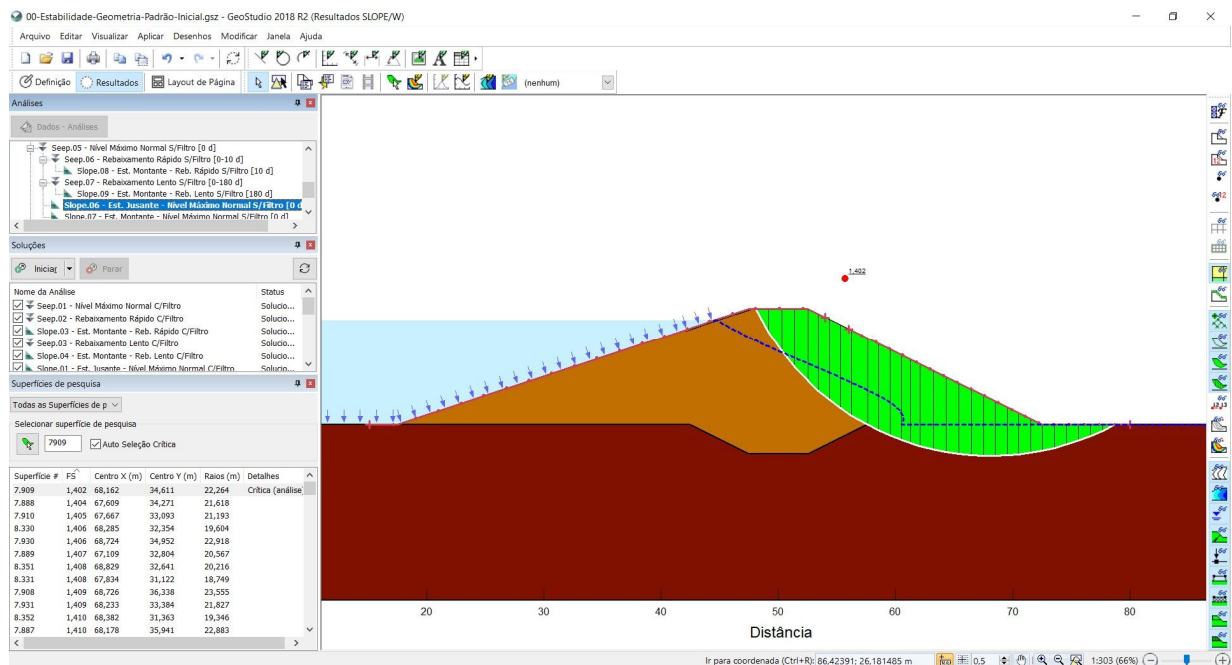
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 13: Estabilidade do talude de jusante: nível máximo *maximorum* com filtro.



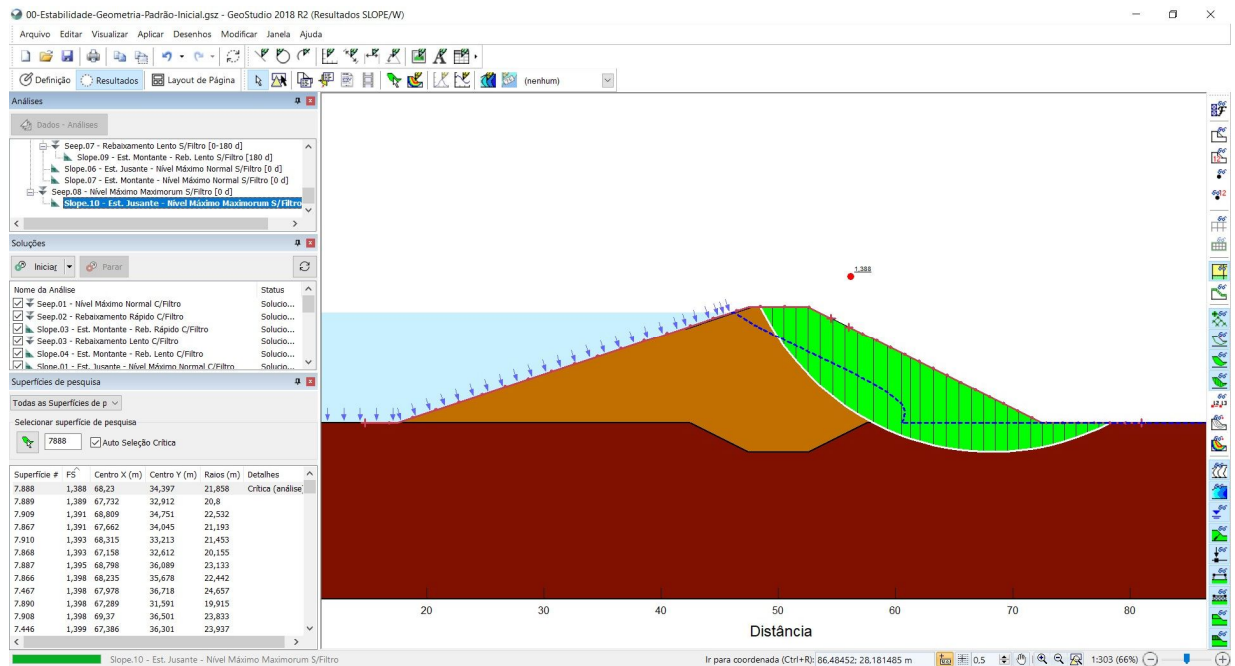
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 14: Estabilidade do talude de jusante: nível máximo normal sem filtro.



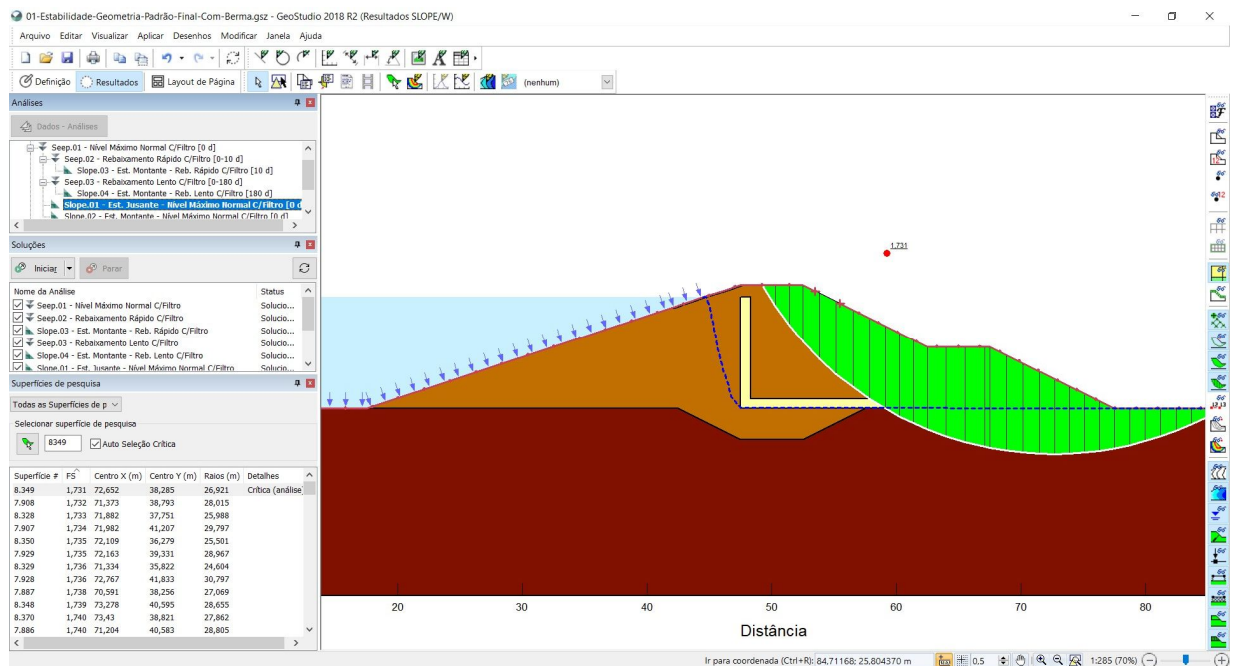
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 15: Estabilidade do talude de jusante: nível máximo *maximorum* sem filtro.



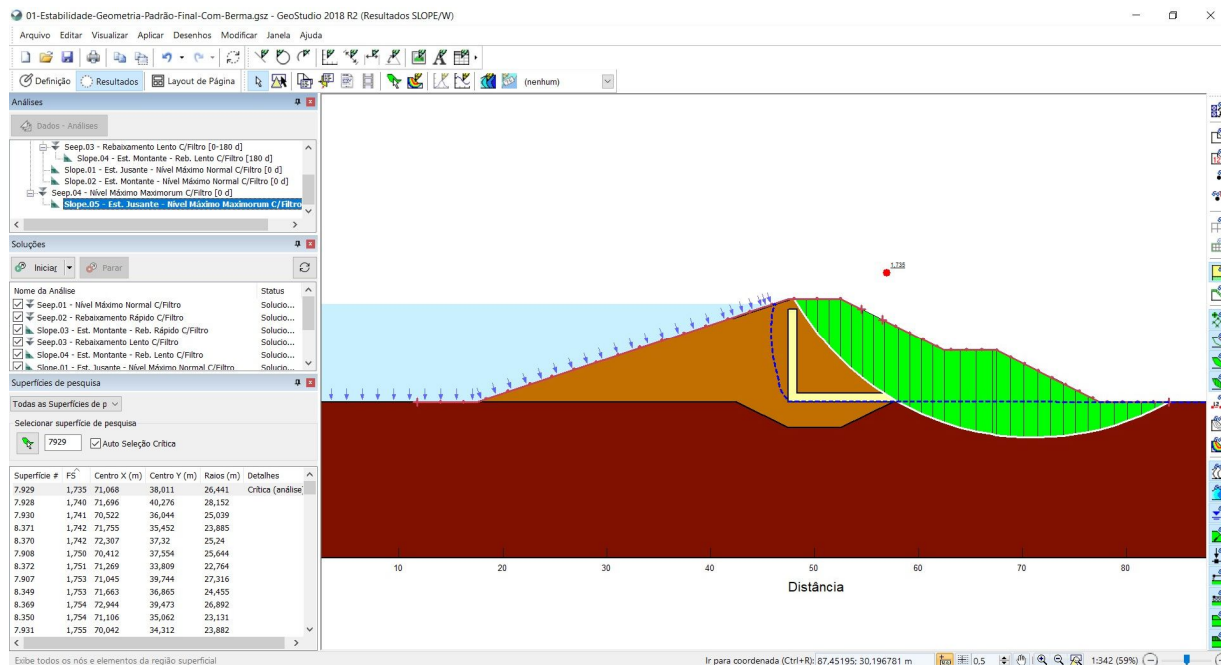
Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 16: Estabilidade do talude de jusante com berma: nível máximo normal com filtro.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 17: Estabilidade do talude de jusante com berma: nível máximo *maximorum* com filtro.



Fonte: Próprio autor, 2025.

5.1.3. Análise comparativa dos cenários de nível d'água e rebaixamento

A comparação entre os diferentes regimes hidráulicos revela a hierarquia de riscos da barragem. Entre os cenários transientes, o rebaixamento lento (180 dias) resultou em um FS de 1,718, ligeiramente superior ao do rebaixamento rápido (10 dias), que apresentou FS de 1,646. Essa diferença sutil ($\Delta FS \approx 0,07$) corrobora a característica de baixa condutividade hidráulica do núcleo argiloso, indicando que, mesmo em um período de seis meses, a dissipação das poropressões é parcial, fazendo com que o comportamento do maciço se aproxime mais de uma condição não drenada do que drenada.

Contraintuitivamente, ao comparar os taludes, observou-se que o cenário mais crítico da barragem não foi o rebaixamento rápido de montante (FS = 1,65), mas sim a operação normal do talude de jusante (FS = 1,47). Isso demonstra que, para a geometria e materiais definidos, o dimensionamento estático do talude de jusante (1V:2H) é o condicionante do projeto, apresentando menor reserva de resistência do que o talude de montante (1V:3H) submetido a condições extremas de operação hidráulica.

5.2. COMPARAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA COM CRITÉRIOS DE NORMAS E LITERATURA

A validação dos resultados foi realizada confrontando os valores calculados com as diretrizes da NBR 13.028 (ABNT, 2017) e do EM 1110-2-1902 (USACE, 2003). Para condições de final de construção e rebaixamento rápido, as normas exigem fatores de segurança mínimos entre 1,10 e 1,30. O valor obtido de 1,646 para o rebaixamento rápido atende com ampla margem a esses requisitos, validando a segurança do talude de montante frente a oscilações operacionais do reservatório.

Por outro lado, para a condição de talude de jusante em regime permanente (longo prazo), as normas preconizam um FS mínimo de 1,50. O resultado obtido de 1,468 situa-se marginalmente abaixo deste limite normativo. Embora não represente risco de ruptura iminente, essa não conformidade técnica indica que a barragem não atende plenamente aos critérios de segurança exigidos para projeto. Sob a ótica da engenharia legal e de segurança de barragens, esse resultado impõe a necessidade de reavaliação dos parâmetros de projeto ou implementação de medidas mitigadoras para elevar o coeficiente de segurança ao patamar normativo.

5.3. ANÁLISE DA EFICÁCIA DO FILTRO DE DRENAGEM NA ESTABILIDADE GLOBAL

A simulação do cenário de colmatção do sistema de drenagem evidenciou o papel crucial do filtro e do dreno de pé. Numericamente, a obstrução da drenagem reduziu o Fator de Segurança do talude de jusante de 1,468 para 1,402. Embora a redução no valor absoluto do FS pareça modesta, sustentada pela coesão do solo que mantém o talude estável mesmo saturado, a alteração no regime de fluxo foi drástica.

A análise visual da percolação no cenário sem filtro revelou o fenômeno de surgência da linha freática na face do talude de jusante. Isso demonstra que a função primordial do sistema de drenagem nesta barragem não é apenas o incremento de estabilidade de massa (escorregamento), mas sim a garantia da segurança hidráulica. A ausência de um filtro operante expõe a estrutura a forças de percolação aflorantes que desencadeiam processos de erosão regressiva, um modo de falha progressivo que o método de equilíbrio limite não quantifica diretamente, mas que a modelagem de fluxo identificou como risco crítico.

5.4. POSSÍVEIS MODIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS OU DE PROJETO PARA AUMENTO DE SEGURANÇA

Diante do Fator de Segurança de 1,468 para o talude de jusante, inferior ao recomendado por norma (1,50), identificam-se intervenções projetuais necessárias para a adequação da estrutura. A alternativa mais viável para barragens já construídas consiste na execução de uma berma de equilíbrio no pé do talude de jusante. Essa solução atua como um contrapeso mecânico, aumentando as forças resistentes na região onde a superfície de ruptura tende a aflorar, elevando o FS global sem a necessidade de reconstrução do maciço.

Alternativamente, caso haja restrições de espaço físico a jusante, recomenda-se a suavização da geometria do talude (retaludamento), alterando a inclinação de 1V:2H para 1V:2,5H, o que reduziria as tensões cisalhantes mobilizadas. Complementarmente, a manutenção rigorosa ou a instalação de drenos horizontais profundos (DHP) pode ser empregada para garantir o rebaixamento da linha freática, maximizando a resistência efetiva do solo e prevenindo a saturação do pé do talude, fator que, como visto na seção 5.3, é determinante para a segurança a longo prazo.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho cumpriu seu objetivo principal ao analisar o comportamento geomecânico e hidráulico de uma barragem de terra homogênea, utilizando a modelagem numérica computacional como ferramenta de diagnóstico de segurança. A integração entre as análises de fluxo (SEEP/W) e de equilíbrio limite (SLOPE/W) permitiu uma avaliação holística da estrutura, transcendendo a simples verificação de estabilidade de massa e incorporando a influência crítica das poropressões e do regime de percolação na segurança global.

As simulações dos cenários transientes no talude de montante demonstraram a robustez da geometria 1V:3H adotada. Mesmo sob a condição crítica de rebaixamento rápido, onde a remoção do confinamento hidráulico do reservatório ocorre em velocidade superior à dissipação das poropressões no núcleo argiloso, o Fator de Segurança mínimo obtido foi de 1,646. Este resultado, confortavelmente superior aos limites normativos de 1,10 a 1,20, valida o dimensionamento do paramento de montante e a coesão do material compactado como barreiras eficazes contra a instabilidade por variação de nível operacional.

Em contrapartida, a análise do talude de jusante em regime permanente revelou-se o cenário condicionante do projeto. O Fator de Segurança de 1,468, embora indicativo de estabilidade física ($FS > 1,0$), situa-se abaixo do critério de 1,50 recomendado pela NBR 13.028 (ABNT, 2017) e diretrizes internacionais para operações de longo prazo. Conclui-se, portanto, que a inclinação de 1V:2H para o solo argiloso estudado apresenta uma margem de segurança exígua. Tal constatação classifica a estrutura em estado de "Alerta", exigindo a implementação de medidas corretivas de projeto, sendo a execução de uma berma de equilíbrio no pé do talude a solução técnica mais indicada para elevar o coeficiente de segurança aos patamares normativos sem demandar a reconstrução do maciço.

Adicionalmente, o estudo da eficácia do sistema de drenagem interna trouxe conclusões fundamentais sobre a durabilidade da obra. A simulação de um cenário de colmatção do filtro resultou não apenas na redução do Fator de Segurança para 1,402, mas, principalmente, na alteração drástica do regime de fluxo, culminando na surgência da linha freática na face do talude de jusante. Este achado permite concluir que a função vital do sistema de drenagem nesta barragem é a garantia da estabilidade hidráulica. A sua falha expõe a obra ao risco iminente de

ruptura por erosão regressiva, um mecanismo de colapso que pode ocorrer mesmo em taludes geometricamente estáveis ao cisalhamento.

Em suma, este trabalho ratifica a indispensabilidade da modelagem numérica na engenharia de barragens moderna. A análise permitiu identificar vulnerabilidades ocultas, como a insuficiência do FS estático de jusante e o potencial de surgência por falha de manutenção, que métodos analíticos simplificados poderiam não detectar. Recomenda-se, para estruturas como a analisada neste trabalho, a adoção imediata de um plano de monitoramento piezométrico rigoroso e a avaliação econômica para a implantação de reforços geométricos a jusante, garantindo assim a longevidade da obra e a segurança das áreas a jusante.

REFERÊNCIAS

ADAMO, N. The Use of Instrumentation in Dams: An Important Tool for Dam Safety. Scienpress, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Curso de Segurança de Barragens. Material produzido no âmbito do Convênio nº 001/ANA/2011. [S.l.: s.n., s.d.].

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Volume VIII – Guia prático de pequenas barragens. Brasília: ANA, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Volumes III e V. Brasília: ANA, [s.d.].

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília: ANA/MDR, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Relatório de Segurança de Barragens 2023. Brasília: ANA, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Resolução n. 121, de 9 de maio de 2022. Brasília, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Resolução n. 236, de 30 de janeiro de 2017. Brasília, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB: Portal Cidadão do SNISB. Brasília, [2025].

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Segurança de Barragens. Brasília, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 160, n. 28, p. 54, 9 fev. 2022

AGUIAR, D. P. O. et al. Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens no Brasil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 3, p. 147–161, 2013.

ALBUQUERQUE, P.J.R.; GARCIA, J. R. Engenharia de Fundações. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

ALONSO, E. E. Slope stability under rapid drawdown conditions. In: Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria, 2009/2010.

ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS (ASDSO). Rapid Drawdown Analysis – What is an Analyst to Do? 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13028: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13028: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água — Requisitos. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 14724: Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

AMADI, A. A. Shear strength characteristics of simulated lateritic soil–bentonite waste containment barriers. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 31, n. 4, p. 1061-1072, 2013.

ATHANI, S. S. et al. Seepage and Slope Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, v. 3, p. 21-30, 2015.

BENTLEY SYSTEMS. PLAXIS 2D: Geotechnical Engineering Software. [S.l.], [s.d.].

BRASIL. Decreto n. 11.310, de 26 de dezembro de 2022. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2022.

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. Altera a Lei nº 12.334/2010. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 01 out. 2020.

CARDIA, R. J. Inspeção e Segurança em Barragens de Usos Múltiplos – Capítulo 4: Instrumentação de Auscultação em Barragens. Apostila de curso. [S.l.: s.n., s.d.].

CARMO, F. F. do et al. The environmental tragedy of the largest technological disaster in Brazil: an overview of the Fundão tailings dam failure. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2017.

CARNEIRO, A. et al. Avaliação de segurança de barragens de mineração: critérios e premissas com base nas legislações vigentes. *Anais do Congresso Brasileiro de Barragens*, Foz do Iguaçu - PR., 28 e 29 de ago. 2023.

CARNEIRO, H. F. [Estudo sobre processos de erosão interna e estabilidade em barragens de terra]. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, 2022.

CARVALHO, D. Barragens: uma introdução para graduandos – IV: principais elementos. Goiânia: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). Lei 14.066/2020 altera Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, 2020.

- DIAS, R. L. [Estudo comparativo entre instrumentos de monitoramento de juntas de contração de uma barragem de concreto compactado com rolo]. Curitiba, 2018.
- DUNCAN, J. M. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, n. 4, p. 307–316, 2000.
- DUNCAN, J. M. Soil Slope Stability Analysis. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (org.). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Washington, D.C.: TRB, 1996.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. *Soil Strength and Slope Stability*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Typhoon Nina–Banqiao dam failure. Chicago, 2025.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Manual on Small Earth Dams: A Guide to Siting, Design and Construction*. Rome, 2010.
- FELL, R. Internal erosion and piping of embankment dams and their foundations. In: 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics. Brisbane, 2007.
- FEMA. Federal Guidelines for Dam Safety. Federal Emergency Management Agency (FEMA P-1025), 2005.
- FERNANDES, T. S. et al. Biological, physicochemical, and social impacts resulting from the Brumadinho tailings dam rupture. *Ambiente & Água*, 2025.
- FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 37, n. 5, p. 1000–1024, 2000.
- GEO-SLOPE INTERNATIONAL. *Seepage Modeling with SEEP/W – An Engineering Methodology*. Calgary, 2007.
- GEO-SLOPE INTERNATIONAL; SEEQUENT. *Stability Modeling with SLOPE/W*. Calgary/Christchurch, 2022.
- HATJE, V. et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam disasters in the world. *Science of the Total Environment*, 2017.
- HEITLAND, J.; DONAGHY, H.; MONTANA DNRC. *Seepage and Slope Stability Modeling for Embankment Dams*. Helena, 2021.
- HIBEN, M. *GeoStudio Training Manual*. [S.l.], 2019.
- ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Dams’ Safety is at the Very Origin of the Foundation of ICOLD*. Paris, 2024.
- ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations*. Bulletin 164. Paris, 2013.
- INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. *Dam safety: identifying and communicating risk*. 2015.

ITASCA CONSULTANTS. FLAC 2D – Geomechanical Software for Analyzing and Simulating Dynamics in 2D. Lyon, 2019–2025.

KAR, Saurav Shekhar; ROY, L. B. Slope Stability Analysis of an Earthen Dam using GEOSTUDIO 2007 Software. [S.l.: s.n.], [s.d.].

KIM, J. et al. Instability of embankment slopes due to overflow and drawdown. *Water*, v. 15, n. 19, 3402, 2023.

KRAHN, J. Seepage Modeling with SEEP/W: An Engineering Methodology. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd., 2004.

LIFRIERI, J. J. Slope Stability. PDHonline Course C254. [S.l.]: PDHonline, 2020.

LUKIANCHUKI, J. A.; ESQUIVEL, E. R. Hydraulic Conductivity and Shear Strength Behavior of Compacted Lateritic Soil–Bentonite Mixtures Used for Sanitary Landfill Liners. *Soils and Rocks*, v. 33, n. 2, p. 83–95, 2010.

LYU, Z. et al. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures. *Journal of Cleaner Production*, v. 218, p. 943-956, 2019.

MALUF, C. B. et al. Laboratory profile after mining dam breach: Brumadinho, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, v. 25, supl. 2, e220013, 2022.

MARQUES, E. M. Segurança em Barragens de Terra. Campo Grande: IMASUL, 2023.

NASSER, R. Statistical Analysis of Global Dam Accidents in the 21st Century. *Hydrological Sciences Journal*, 2025.

OLADEJO, O. S.; OGUNBODE, I. R. Shear strength parameters as a measure of slope stability of an earthfill dam: a case study of Awba Dam University of Ibadan, Nigeria. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, v. 5, n. 1, p. 288-294, 2018.

OSINUBI, K. J.; NWAIWU, C. M. O. Hydraulic Conductivity of Compacted Lateritic Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 131, n. 8, 2005.

PALU, M. C.; JULIEN, P. Y. Floodwave and sediment transport assessment along the Doce River after the Fundão tailings dam collapse (Brazil). *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 145, n. 5, p. 1–14, 2019.

PALU, M. C.; JULIEN, P. Y. Review of tailings dam failures in Brazil. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRHidro, 2019.

RODRIGUES, E. L. L. et al. Estado da arte na instrumentação e monitoramento de barragens de acumulação de água. In: Congresso Brasileiro de Barragens, 32., 2022. Anais...

SANTOS, L. C. [Dissertação sobre instrumentação de barragens de terra e enrocamento]. Uberlândia, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia.

- SANTOS, R. A.; ESQUIVEL, E. R. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 10, p. 986-991, 2018.
- SCHNAID, F. et al. Guidelines and recommendations on minimum factors of safety for slope stability of tailings dams. *Soils and Rocks*, v. 43, n. 3, p. 369-395, 2020.
- SEEQUENT LIMITED. *GeoStudio 2D – 2D Geotechnical Analysis for Soil and Rock*. Christchurch, 2024.
- SEEQUENT LIMITED. *GeoStudio Core: Integrating SLOPE/W, SEEP/W, and SIGMA/W to Solve More Complex Problems*. 2021.
- SEEQUENT LIMITED. *Stability Modeling with SLOPE/W*. [S.l.]: Seequent Limited, 2022.
- SIACARA, A. T. et al. Geotechnical Analysis of a Zoned Dam: Initial Steps. In: *Dam World 2018*. Lisboa, 2018.
- SILVA, L. C.; MATTOS, U. A. O.; SILVA, J. C. Dams safety: an analysis of safety management and the difficulties of its supervision. *Ciência e Natura*, v. 45, e4, 2023.
- SOARES, L. L.; VIANA, M. R. Vidas arrastadas: a ruptura da barragem Algodões I. *Revista FSA*, v. 13, n. 3, p. 247–264, 2016.
- STEPHENS, T. *Manual on Small Earth Dams: A Guide to Siting, Design and Construction*. Rome: FAO, 2010.
- SUPERVISION ENTERPRISE. *GeoStudio Training Manual for Slope Stability Analysis in Engineering*. [S.l.: s.n., s.d.].
- SYNERGIA SOCIOAMBIENTAL. Decreto 11.310/2022 e a Política Nacional de Segurança de Barragens: principais pontos e impactos. São Paulo, 2023.
- UBANI, O. *Earth dams: types, construction, and modes of failure*. Structville, 2021.
- ULLAH, S.; KHAN, M. U.; REHMAN, G. A Brief Review of the Slope Stability Analysis Methods. *Geological Behavior*, v. 4, n. 2, p. 73-77, 2020.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). EM 1110-2-1901 – Seepage Analysis and Control for Dams. Washington, D.C., 1986.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). EM 1110-2-1902 – Slope Stability. Washington, D.C., 2003.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). EM 1110-2-1908 – Instrumentation of Embankment Dams and Levees. Washington, D.C., 1995.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). EM 1110-2-2300 – General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams. Washington, D.C., 2004.
- UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis – D5: Embankment Slope Instability*. Denver, 2019.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). Design of Small Dams. 3. ed. Denver, 1987.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). Earth Manual, Part 1 – Third Edition. Denver, 1998.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). Embankment Dam Instrumentation Manual. Denver, 1987.

UNITED STATES SOCIETY ON DAMS (USSD). Materials for Embankment Dams. Denver: USSD Committee on Materials for Embankment Dams, 2011.

VALENCIO, N. F. L. S. Crises entretecidas por colapso de barragens: da reconexão de espaços às narrativas hesitantes. Revista Estudios Avanzados, n. 31, p. 42–65, 2019.

VANDENBERGE, D. R. Total stress rapid drawdown analysis of the Pilarcitos Dam failure. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, v. 8, p. 264–276, 2014.

VECCHI, N. et al. Evaluation of the stability of an iron mining tailings dam. Revista do RegNE, 2024.

VERGÍLIO, C. S. et al. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). Chemosphere, v. 254, 126804, 2020.

VERRUIJT, A. Soil Mechanics. Delft: Delft University of Technology, 2012.

VGO INC. Epic fails in engineering – Banqiao Dam. 2016.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY. Dam Safety Guidelines – Dam Owner’s Guidance Manual. Olympia, 2002.

WATKINS, T. The catastrophic dam failures in China in August 1975. San Jose State University, 2005.

WIGHTMAN, A.; NORRIS, N. Risk-based approach to Factor of Safety selection. NZ Geomechanics News, Issue 108, 2024/2025.

WORLD BANK. Global Analysis of Regulatory Frameworks for the Safety of Dams and Downstream Communities. Washington, DC, 2020.

WORLD BANK. Good Practice Note on Dam Safety: New Guidance on Managing Risks Associated with Dams. Washington, DC, 2021.