



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



GEOVANNA FERREIRA DA CONCEIÇÃO

PIPING EM BARRAGENS DE REJEITOS:
UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELAGENS NUMÉRICAS EM 2D E 3D

OURO PRETO
Abril 2025

Piping em Barragens de Rejeitos: Um Estudo Comparativo entre Modelagens Numéricas em
2D e 3D

Geovanna Ferreira da Conceição

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

Data da aprovação: 11/04/2025.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch – UFOP.

Coorientador: Prof. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro – DSc – GeoFast.

OURO PRETO

Abril 2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C744p Conceicao, Geovanna Ferreira Da.
Piping em barragens de rejeitos [manuscrito]: um estudo comparativo entre modelagens numéricas em 2D e 3D. / Geovanna Ferreira Da Conceicao. - 2025.
83 f.: il.: color., gráf., tab..

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

1. Barragens de rejeitos - Erosão -Piping. 2. Cálculos numéricos - Modelagem. 3. Barragens de rejeitos. 4. GeoStudio (Software). 5. SEEP/W (software). I. Loch, Felipe de Campos. II. Ribeiro, Saulo Gutemberg Silva. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Geovanna Ferreira da Conceição

Piping em Barragens de Rejeitos: Um Estudo Comparativo entre Modelagens Numéricas em 2D e 3D

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

Aprovada em 11 de abril de 2025

Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch -Orientador - DECIV - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Saulo Gutemberg Silva Ribeiro - Coorientador - GeoFast
Eng. Fernando Blanco Ferreira - LP Engenharia
Eng. Wellington Fardin - GeoFast

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/04/2025, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0894739** e o código CRC **15F5DE4A**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me sustentar em cada etapa desta caminhada e por permitir que este sonho se tornasse realidade.

À minha família, pelo apoio e pelas orações constantes. Obrigada por não medirem esforços para tornar possível a conquista deste objetivo.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Ouro Preto, especialmente da Escola de Minas, pelo compromisso com a formação acadêmica de seus alunos. Sou grata pelos ensinamentos e pelas oportunidades que me foram oferecidas ao longo do curso.

À GeoFast, por ter aberto as portas para o universo da Geotecnia e por me proporcionar as ferramentas necessárias para a realização deste trabalho. Agradeço imensamente pelas oportunidades de aprendizado, pelo incentivo e pela confiança depositada em mim ao longo dessa trajetória.

E a todas as pessoas que, de alguma forma, passaram por essa jornada ao meu lado e contribuíram para que este trabalho fosse concluído. Cada gesto de apoio, palavra de incentivo e demonstração de carinho teve um papel fundamental na realização deste sonho.

RESUMO

A segurança em barragens tem ganhado destaque diante de eventos catastróficos associados à instabilidade estrutural e à erosão interna. Dentre os mecanismos que levam a falhas, o *piping* — forma de erosão causada pela percolação de água — se mostra particularmente relevante. Este trabalho tem como objetivo comparar modelagens numéricas 2D e 3D aplicadas à análise do *piping* em barragens, com base em uma mesma geometria de barragem de rejeitos simulada no *software* GeoStudio (módulos SEEP/W 2D e 3D). Foram construídos modelos considerando quatro fases de avanço do *piping*, com propriedades hidráulicas, condições de contorno, malhas e pontos de monitoramento. A modelagem 3D exigiu maior detalhamento geométrico e representação de canais internos, enquanto a 2D permitiu simulações mais diretas. Os resultados mostram que a modelagem 3D oferece maior realismo na representação do escoamento e na sensibilidade dos piezômetros simulados, enquanto a 2D se destaca pela simplicidade, agilidade e menor custo computacional. Ambas as abordagens são complementares: a 2D é eficaz para análises preliminares, e a 3D para investigações mais detalhadas. Conclui-se que a modelagem numérica é ferramenta essencial na prevenção de falhas, contribuindo para a segurança de estruturas críticas.

Palavras-chaves: *Piping*; Modelagem numérica; Barragens de rejeitos; GeoStudio; SEEP/W; Erosão interna.

ABSTRACT

Dam safety has gained prominence in light of catastrophic events associated with structural instability and internal erosion. Among the mechanisms that lead to failures, piping—a form of erosion caused by water seepage—stands out as particularly relevant. This study aims to compare 2D and 3D numerical modeling applied to piping analysis in dams, based on a single tailings dam geometry simulated using GeoStudio *software* (SEEP/W module). Models were developed considering four stages of piping progression, with hydraulic properties, boundary conditions, mesh generation, and monitoring points. The 3D modeling required more detailed geometry and the representation of internal channels, while the 2D simulation allowed for more direct execution. The results show that 3D modeling provides greater realism in flow representation and in the sensitivity of the simulated piezometers, whereas the 2D model stands out for its simplicity, agility, and lower computational demand. Both approaches are complementary: 2D modeling is effective for preliminary assessments, while 3D is advantageous for more detailed investigations. It is concluded that numerical modeling is an essential tool for failure prevention, contributing to the safety of critical structures.

Keywords: Piping; Numerical modeling; Tailings dams; GeoStudio; SEEP/W; Internal erosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seções típicas de barragens de terra homogênea com diferentes soluções de drenagem interna.....	18
Figura 2 - Seção esquemática de barragem de enrocamento com vedação central (BEVC).....	19
Figura 3 – Seção esquemática de barragem zoneada de terra e enrocamento.....	21
Figura 4 – Tipos estruturais de barragens de concreto.....	22
Figura 5 – Barragem de rejeitos localizada no distrito de Antônio Pereira em Ouro Preto/MG.....	24
Figura 6 – Modelos para o desenvolvimento da falha por erosão interna, representando as fases de início, continuação, progressão e colapso.....	27
Figura 7 – Vista da Barragem Baldwin Hills (Califórnia, EUA) após sua ruptura em 14 de dezembro de 1963.....	32
Figura 8 - Momento da ruptura da Barragem de Teton em 1976.....	33
Figura 9 – Vista da ruptura do Dique Quail Creek (Utah, EUA) em 1989.....	34
Figura 10 – Vista aérea da trilha de destruição provocada pelo rompimento da barragem de Fundão (Mariana/MG), ocorrido em 5 de novembro de 2015.....	35
Figura 11 – Vista aérea da área afetada pela ruptura da barragem de rejeitos em Chambishi, Zâmbia, ocorrida em 18 de fevereiro de 2025.....	37
Figura 12 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento das modelagens 2D e 3D.....	48
Figura 13 – Ambiente de criação de análises no GeoStudio.....	51
Figura 14 – Configuração da geometria, unidades e eixos no GeoStudio.....	52
Figura 15 – Seção transversal da barragem completamente configurada no SEEP/W.....	55
Figura 16 – Representação da linha de fluxo traçada no SEEP/W para simulação do <i>piping</i>	57
Figura 17 – Aplicação do material filtro nas Fases 1 e 2 da trajetória simulada de <i>piping</i>	58
Figura 18 – Representação do <i>piping</i> estabelecido na modelagem 2D.....	59
Figura 19 - Geometria extrudada a partir do modelo bidimensional para composição do modelo 3D.....	61
Figura 20 – Geometria do canal de <i>piping</i> desenvolvido no modelo 3D.....	62
Figura 21 – Representação da Fase 1 do <i>piping</i> no modelo 3D.....	63

Figura 22 – Representação da Fase 2 do <i>piping</i> no modelo 3D.	63
Figura 23 – Representação da Fase 3 do <i>piping</i> no modelo 3D.	64
Figura 24 – Representação do <i>piping</i> estabelecido no modelo 3D.....	64
Figura 25 – Verificação da qualidade dos elementos da malha no modelo tridimensional.	65
Figura 26 – Linha freática obtida na análise inicial da modelagem bidimensional (2D), representando o regime permanente sem presença de anomalias.....	70
Figura 27 – Linha freática obtida na fase de <i>piping</i> estabelecido da modelagem bidimensional (2D), evidenciando alterações no trajeto do fluxo.....	70
Figura 28 – Gráfico do comportamento da piezometria ao longo das fases da modelagem 2D.	71
Figura 29 – Variação da carga de pressão de água (Δh) nos piezômetros simulados nas diferentes fases de <i>piping</i> na modelagem bidimensional (2D).....	73
Figura 30 - Linha freática obtida na fase de regime permanente da modelagem tridimensional (3D).....	74
Figura 31 – Linha freática obtida na fase de <i>piping</i> estabelecido na modelagem tridimensional (3D).....	74
Figura 32 – Variação da carga de pressão de água no PZ01 durante as fases de <i>piping</i> no modelo 3D.	75
Figura 33 – Variação da carga piezométrica (Δh) em cada ponto de monitoramento ao longo das fases simuladas de <i>piping</i> – Modelagem 3D.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades hidráulicas dos materiais utilizados na modelagem numérica.	52
Tabela 2 – Variação da carga de pressão de água (Δh) ao longo das fases do <i>piping</i> – Modelagem 2D.	72
Tabela 3 – Variação da carga piezométrica (Δh) em cada ponto de monitoramento ao longo das fases simuladas de <i>piping</i> – Modelagem 3D.	77

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
1.1. Objetivo	14
1.1.1. Objetivos específicos	14
1.2. Justificativa	15
1.3. Estrutura do texto.....	15
2. Revisão da literatura	16
2.1. Barragens: conceitos, tipos e características.....	16
2.1.1. Barragens de Terra.....	17
2.1.2. Barragens de enrocamento.....	19
2.1.3. Barragens mistas.....	20
2.1.4. Barragens de concreto	21
2.1.5. Barragens de Rejeitos	23
2.2. Erosão interna (<i>piping</i>) em barragens	24
2.2.1. Principais fases da erosão interna.....	25
2.2.2. Mecanismos de <i>piping</i>	27
2.2.3. Tipos de <i>piping</i>	29
2.2.4. Métodos de Detecção e Monitoramento	30
2.2.5. Análise histórica	31
2.2.6. Consequências do <i>piping</i>	37
2.2.7. Estratégias de Mitigação.....	38
2.3. Modelagem numérica aplicada à engenharia geotécnica.....	39
2.3.1. Introdução à Modelagem Numérica	39
2.3.2. Fundamentos da Modelagem Numérica	40
2.3.3. Aplicações na Engenharia Geotécnica	41

2.3.4.	Vantagens e Limitações da Modelagem Numérica.....	43
2.4.	Modelagens 2D E 3D.....	43
2.4.1.	Modelagem 2D	43
2.4.2.	Modelagem 3D	44
2.4.3.	Avaliação da aplicabilidade de modelagens 2D e 3D.....	45
3.	Metodologia.....	47
3.1.	Fluxograma	47
3.2.	Modelagem numérica	48
3.2.1.	Módulo SEEP/W	49
3.2.2.	Modelagem Bidimensional (2D)	50
3.2.3.	Modelagem tridimensional (3D)	60
3.3.	Critérios de análise.....	66
3.4.	Validação dos resultados	67
4.	Resultados e Discussões	69
4.1.	Resultados da modelagem 2D.....	69
4.1.1.	Linha freática – 2D	69
4.1.2.	Comportamento da Piezometria – 2D	71
4.1.3.	Sensibilidade dos Piezômetros – 2D	72
4.2.	Análise dos resultados 3D.....	73
4.2.1.	Linha freática – 3D	73
4.2.2.	Comportamento da Piezometria – 3D	75
4.2.3.	Sensibilidade dos Piezômetros – 3D	76
4.3.	Discussão dos resultados	78
5.	Conclusão	81
5.1.	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	83

1. INTRODUÇÃO

A segurança em barragens é uma questão de extrema importância no Brasil, onde a utilização dessas estruturas é fundamental para diversos setores, como abastecimento de água, controle de enchentes e geração de energia. O país possui mais de 24 mil barragens cadastradas, das quais cerca de 3% são destinadas à contenção de rejeitos de mineração (BRASIL, 2020; ANM, 2019). Esse cenário impõe desafios significativos em termos de segurança e estabilidade, especialmente diante da recorrência de acidentes com impactos ambientais, sociais e econômicos relevantes (Mongenstern *et al*, 2016).

Em escala global, estima-se que existam mais de 58 mil grandes barragens em operação, com uma média anual de 2 a 5 falhas registradas, ressaltando a necessidade de um gerenciamento rigoroso e eficaz (ICOLD, 2023 *apud* FOSTER; FELL, 1999). Incidentes como os ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) evidenciam a urgência de estudos aprofundados sobre os mecanismos que levam à instabilidade dessas estruturas, entre os quais se destaca o *piping*, um processo específico de erosão interna responsável por diversas falhas documentadas (FOSTER; FELL; SPENCER, 2000).

Compreender as causas do *piping* e de outras anomalias é fundamental para a prevenção de falhas e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação de riscos. A investigação desses mecanismos permite identificar zonas críticas no interior do maciço, possibilitando a aplicação de medidas preventivas antes que ocorra o agravamento das condições estruturais (FELL *et al.*, 2003; ZANON, 2020).

Nesse contexto, a modelagem numérica surge como uma ferramenta essencial, pois permite simular diferentes cenários e avaliar o comportamento hidráulico das barragens sob condições específicas. *Softwares* como o GeoStudio, por meio do módulo SEEP/W, oferecem recursos avançados para análises em regime permanente ou transiente, com representação precisa das propriedades dos materiais e das trajetórias de fluxo (SEEQUENT, 2023). Essa abordagem facilita a detecção de gradientes críticos, pressões neutras elevadas e zonas suscetíveis à erosão.

Apesar da popularidade da modelagem 2D, a adoção da abordagem tridimensional vem ganhando destaque, especialmente por permitir uma representação mais fiel da geometria real e da distribuição espacial do fluxo (ROBBINS; GRIFFITHS, 2018). A modelagem em 3D

possibilita avaliar com maior precisão a evolução da poropressão e os efeitos localizados da percolação, aspectos que muitas vezes não são capturados com profundidade em análises bidimensionais.

Diante disso, este trabalho buscará responder à seguinte questão: “Quais são as diferenças entre modelagens numéricas 2D e 3D na avaliação de *piping* em barragens?”. As hipóteses iniciais sugerem que a modelagem numérica 3D é mais complexa do que a 2D, demandando um maior volume de dados e informações para seu desenvolvimento. Espera-se que a modelagem 3D ofereça resultados mais consistentes em comparação à modelagem 2D, visto que a análise tridimensional proporciona uma representação mais fiel da realidade em relação à abordagem bidimensional. No entanto, a modelagem 2D pode permitir um maior número de possibilidades, dada sua utilização nas práticas de engenharia e o fato de que a modelagem 3D ainda está em processo de difusão.

1.1. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo geral comparar modelagens numéricas 2D e 3D para a análise da anomalia *piping*, com o intuito de identificar as principais diferenças e desafios no uso de ambas as técnicas.

1.1.1. Objetivos específicos

Essa pesquisa busca esclarecer os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver modelos numéricos 2D e 3D para a análise de *piping* em barragens, utilizando o software GeoStudio.
- Comparar as exigências de dados e complexidade no desenvolvimento dos modelos 2D e 3D.
- Avaliar os modelos 2D e 3D na identificação de anomalias, considerando critérios como a diferença nos resultados, tempo de processamento e adequação às condições reais das barragens.
- Analisar a aplicabilidade e as limitações das modelagens 2D e 3D no contexto de estudos de barragens, considerando o estado da arte.
- Compreender as vantagens e limitações de cada abordagem (2D e 3D).

1.2. JUSTIFICATIVA

A segurança de barragens é um tema de extrema importância, especialmente diante dos riscos e impactos associados às suas falhas. Estudos estatísticos realizados por Foster *et al.* (1998) indicam que os mecanismos de erosão, incluindo o galgamento e a erosão interna, representam 94% das rupturas de barragens documentadas entre 1800 e 1986, sendo a erosão interna responsável por 46% dos casos (PIMENTA FILHO, 2013). Esses dados evidenciam a relevância da erosão interna como uma das principais causas de colapso dessas estruturas, destacando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o fenômeno de *piping*.

Apesar da gravidade desse mecanismo de falha, a análise de *piping* ainda é pouco explorada na literatura no que diz respeito a modelagens numéricas 2D e 3D. A escassez de pesquisas que abordem essa temática limita o desenvolvimento de práticas mais eficazes na prevenção de riscos, evidenciando a necessidade de investigações mais aprofundadas.

Diante desse cenário, este trabalho busca contribuir para o avanço do conhecimento técnico ao oferecer uma análise comparativa entre modelagens numéricas 2D e 3D aplicadas ao estudo de *piping*. Além disso, pretende fornecer ferramentas que possam ser utilizadas na gestão e mitigação de riscos em barragens, promovendo maior segurança para as comunidades e o meio ambiente.

1.3. ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, sendo eles:

- Capítulo 1: apresenta as considerações iniciais, os objetivos do estudo e a estrutura do trabalho.
- Capítulo 2: apresenta a revisão bibliográfica, que abrange conceitos cruciais para o entendimento do tema.
- Capítulo 3: apresenta a metodologia aplicada para o desenvolvimento prático do tema.
- Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos.
- Capítulo 5: apresenta as conclusões obtidas e sugestões para futuros trabalhos.
- Capítulo 6: apresenta as referências utilizadas no trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. BARRAGENS: CONCEITOS, TIPOS E CARACTERÍSTICAS

As barragens são estruturas construídas com a finalidade de reter ou desviar o fluxo de água, rejeitos ou outros materiais líquidos, sendo utilizadas em diversos contextos como abastecimento, irrigação, controle de cheias, produção de energia, recreação e contenção de resíduos industriais ou da mineração (CBDB, 2011). São elementos centrais em obras hidráulicas e geotécnicas, com séculos de evolução técnica desde as primeiras construções do Egito Antigo, há mais de 6.000 anos (JESUS, 2011; SOUZA, 2013).

A definição mais amplamente aceita vem do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), que caracteriza barragens como obstáculos artificiais capazes de reter líquidos, detritos ou rejeitos para fins de armazenamento, regulação ou controle. As barragens podem ser classificadas segundo diferentes critérios, a depender do enfoque adotado. Dentre os principais critérios reconhecidos na literatura técnica e por órgãos como o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2011), destacam-se: a finalidade, o material de construção, o método construtivo, a forma estrutural e o tipo de fundação.

Quanto à finalidade, as barragens podem ter usos múltiplos, como abastecimento, geração de energia, irrigação, controle de cheias, recreação ou contenção de rejeitos (MASSAD, 2010). Em relação ao material, são classificadas como barragens de terra, de enrocamento, mistas, de concreto ou, em casos específicos, de gabiões e outros materiais (USBR, 2002; CBDB, 2011). O critério construtivo considera a forma como são executadas, como alteamento a montante, jusante ou por linha de centro — especialmente relevante no caso das barragens de rejeitos (CARDOSO, 2023). A forma estrutural refere-se à geometria e ao modo de absorção dos esforços hidráulicos, sendo comum em barragens de concreto, como as de gravidade, arco ou contraforte (TERZAGHI *et al.*, 2000). Por fim, a fundação influencia diretamente na estabilidade da estrutura e pode ser classificada conforme o tipo de substrato onde a barragem é construída, como rochas sãs, solos residuais ou saprolíticos (SOUZA, 2013; LADEIRA, 2013).

Para os fins deste trabalho, adotou-se como base a classificação segundo o material de construção, por ser aquela que mais se relaciona com o comportamento hidráulico da estrutura

e com os mecanismos envolvidos na erosão interna, foco central do presente estudo (FELL *et al.*, 2003; PIMENTA FILHO, 2013). Essa abordagem permite uma análise técnica mais direcionada aos processos de percolação e *piping*. No entanto, optou-se por incluir também, de forma complementar, as barragens de rejeitos, ainda que sua classificação principal esteja associada à finalidade da estrutura. Tal decisão se justifica pela relevância desse tipo de barragem no contexto brasileiro, pela recorrência de eventos de falha associados à percolação, e, sobretudo, por suas características hidráulicas e construtivas específicas, como o uso de alteamentos sucessivos, a heterogeneidade do material e a maior suscetibilidade à erosão interna, amplamente documentada em estudos sobre instabilidade hidráulica em barragens de rejeitos (SILVA, 2016; FELL *et al.*, 2003).

2.1.1. Barragens de Terra

As barragens de terra são as mais comuns no mundo, representando cerca de 63% das estruturas existentes globalmente (SOUZA, 2013). São formadas por materiais terrosos compactados, geralmente disponíveis localmente, o que reduz os custos com transporte e favorece a adaptação da estrutura à geologia do terreno. No Brasil, a predominância desse tipo de barragem está diretamente relacionada à ampla disponibilidade de solos argilosos e à topografia favorável, caracterizada por vales largos e fundações com capacidade de suporte compatível com esse tipo de obra (MASSAD, 2010). Além disso, as barragens de terra têm como vantagem a capacidade de suportar deformações relativamente elevadas, o que as torna adequadas para implantação em áreas com solos moles ou fundações menos rígidas (FELL *et al.*, 2003).

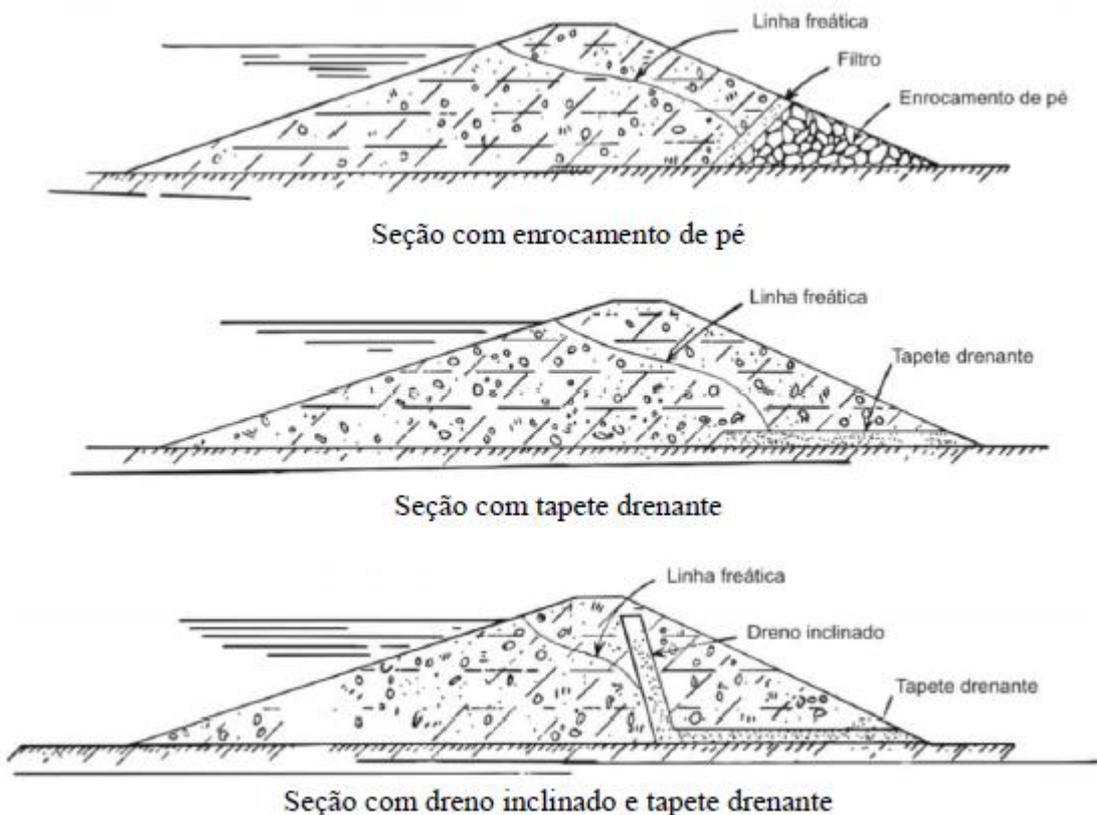
De acordo com sua configuração interna, essas estruturas podem ser classificadas em homogêneas ou zoneadas. As barragens homogêneas são constituídas por um único tipo de solo ao longo de todo o maciço, normalmente um solo de baixa permeabilidade, como a argila. Esse tipo de barragem apresenta execução mais simples, mas exige a adoção de medidas de controle de percolação, como filtros e drenos, para evitar o acúmulo de poropressão interna (USBR, 2002; CBDB, 2011). Já as barragens zoneadas são compostas por diferentes materiais distribuídos em zonas com funções específicas: tipicamente, um núcleo impermeável central, envolvido por zonas de transição com solos de características drenantes e protegidos externamente por camadas de maior resistência, como areia grossa, brita ou enrocamento. Essa disposição proporciona maior eficiência hidráulica, maior controle da percolação e,

consequentemente, maior segurança estrutural ao longo do tempo (CBDB, 2011; PIMENTA FILHO, 2013).

De modo geral, barragens de terra requerem atenção especial quanto ao fluxo de água no interior do maciço, visto que a erosão interna (*piping*) é uma das principais causas de instabilidade nesse tipo de estrutura. Por esse motivo, a adoção de sistemas adequados de drenagem, filtros corretamente projetados e zonas de transição bem definidas são indispensáveis para garantir a estabilidade e a durabilidade da barragem (FOSTER *et al.*, 2000; FELL *et al.*, 2003).

A Figura 1 a seguir apresenta seções típicas de barragens de terra homogênea, destacando diferentes soluções de drenagem interna, utilizadas para mitigar o risco de percolação e erosão.

Figura 1 - Seções típicas de barragens de terra homogênea com diferentes soluções de drenagem interna



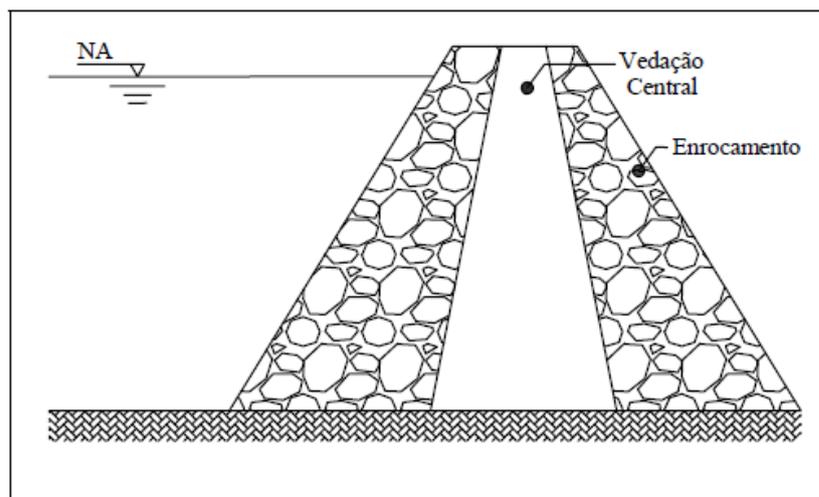
2.1.2. Barragens de enrocamento

As barragens de enrocamento são construídas com blocos de rochas dispostos de forma compactada ou simplesmente lançados em camadas, formando um maciço resistente e estável. Sua aplicação é particularmente vantajosa em regiões onde há grande disponibilidade de material rochoso proveniente de escavações obrigatórias, como em projetos hidrelétricos, e onde se deseja acelerar o cronograma de construção mesmo sob condições climáticas adversas (MASSAD, 2010).

Por apresentarem alta permeabilidade, essas estruturas requerem um elemento de vedação adicional para garantir sua estanqueidade. A posição e o tipo desse elemento definem a classificação da barragem: pode ser central (núcleo impermeável) ou a montante (face de vedação). No primeiro caso, tem-se a Barragem de Enrocamento com Vedação Central (BEVC), na qual o núcleo – geralmente de argila compactada – é posicionado internamente, conferindo maior proteção contra pressões hidráulicas diretas e acomodando melhor os recalques diferenciais entre os materiais (MASSAD, 2010).

Conforme ilustrado na Figura 2, a barragem de enrocamento com vedação central apresenta um núcleo impermeável central envolto por zonas de transição e enrocamento, o que contribui para o controle da percolação e estabilidade da estrutura (CRUZ, 1996).

Figura 2 - Seção esquemática de barragem de enrocamento com vedação central (BEVC).



Fonte: CRUZ (1996).

Já no segundo, a vedação é feita na face montante, podendo ser executada com placas de concreto, membranas metálicas, asfálticas ou sintéticas, como ocorre nas chamadas

Barragens de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC), que apresentam desempenho estrutural eficiente e rapidez construtiva (CRUZ, 1996).

O núcleo argiloso, quando adotado, precisa atender a critérios rigorosos de projeto, incluindo baixa permeabilidade, boa resistência à erosão interna e capacidade de deformação para acompanhar os deslocamentos do enrocamento sem fissurar. Adicionalmente, é comum o uso de camadas horizontais impermeáveis junto à fundação (tapetes drenantes) e filtros nas transições com o enrocamento, como forma de controle da percolação e prevenção do *piping* (DIVINO, 2010).

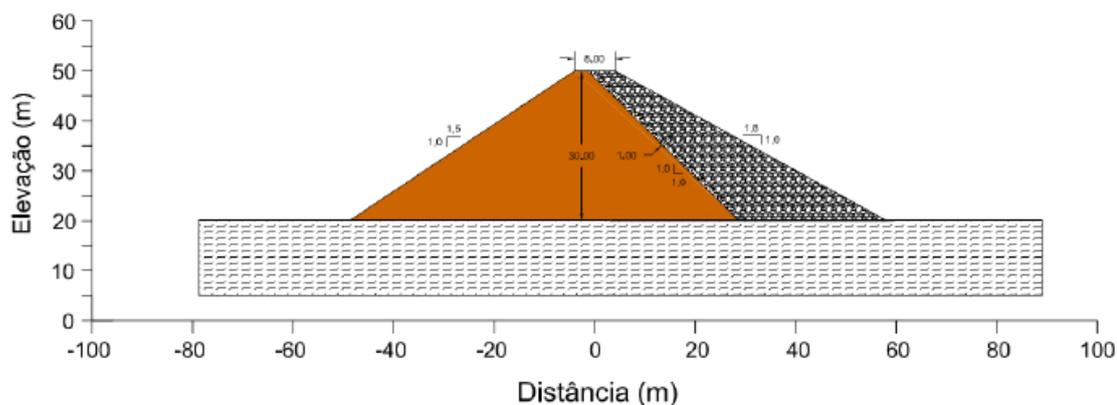
2.1.3. Barragens mistas

As barragens mistas combinam materiais de terra e enrocamento em sua estrutura, buscando aproveitar ao máximo os recursos locais disponíveis e as propriedades específicas de cada material. Esse método construtivo é comum em empreendimentos de médio e grande porte, especialmente quando há escassez de solos adequados para a formação de maciços completamente em terra, mas há abundância de material rochoso proveniente das escavações do próprio canteiro (ELETROBRÁS, 2013; CBDB, 2011).

Nessas barragens, geralmente, um núcleo impermeável de argila é inserido entre camadas de enrocamento ou solo compactado. A escolha e disposição dos materiais seguem critérios de compatibilidade de deformações e eficiência hidráulica. Os enrocamentos costumam ser utilizados nos espaldares, fornecendo estabilidade, enquanto o núcleo central garante a impermeabilidade. A transição entre os materiais, por sua vez, deve ser cuidadosamente projetada para evitar recalques diferenciais e rupturas por filtragem (CRUZ, 1996).

Conforme ilustrado na Figura 3, a barragem mista apresenta uma seção composta por núcleo argiloso central e enrocamentos nos taludes, com zonas de transição entre os materiais. Essa configuração visa aliar a estanqueidade dos solos finos à estabilidade proporcionada pelos materiais granulares, otimizando o desempenho hidráulico e estrutural da barragem (SILVA, 2016).

Figura 3 – Seção esquemática de barragem zoneada de terra e enrocamento.



Fonte: SILVA (2016, p. 115).

A principal vantagem das barragens mistas é a versatilidade, permitindo sua adaptação às condições topográficas e geológicas do local, bem como a execução por etapas e com diferentes equipamentos. Essa flexibilidade construtiva as torna indicadas para situações em que há variações significativas nos materiais disponíveis. No entanto, exigem maior rigor na execução, especialmente nos detalhes construtivos das interfaces entre diferentes materiais, a fim de garantir a compatibilidade de deformações e a segurança da estrutura ao longo do tempo (ELETROBRÁS, 2013 *apud* SILVA, 2016).

2.1.4. Barragens de concreto

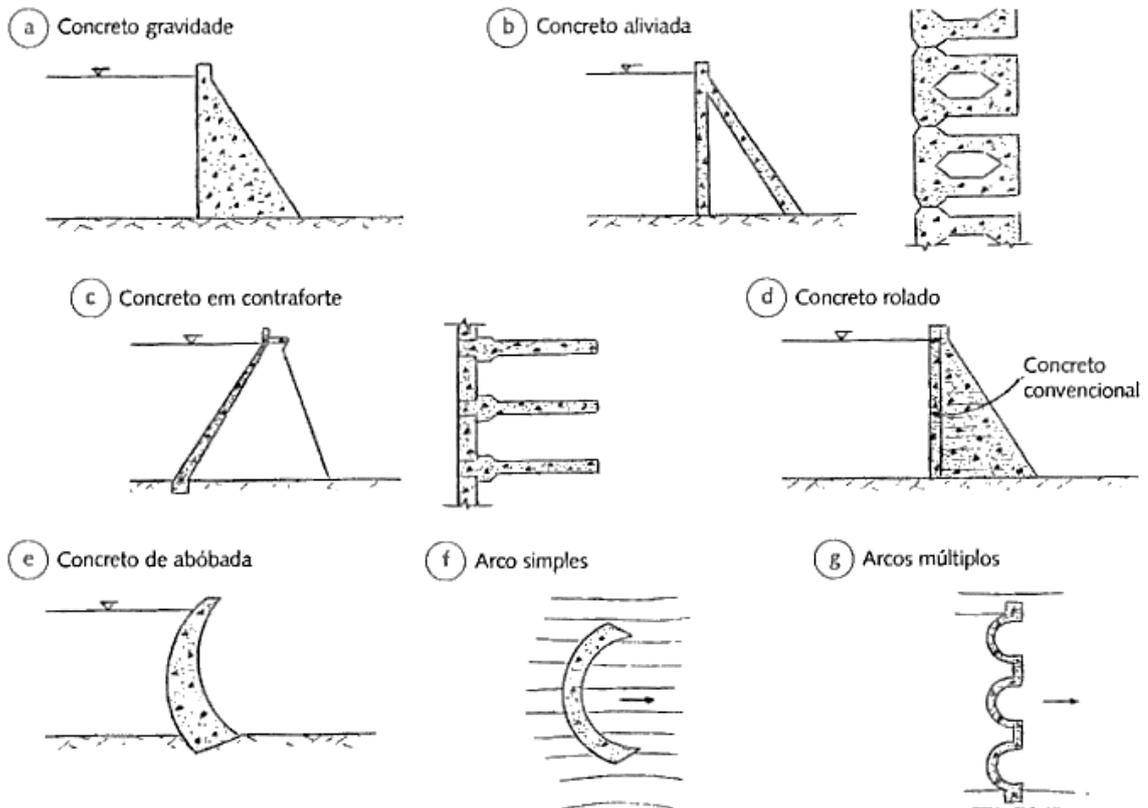
As barragens de concreto representam cerca de 17% das estruturas construídas no mundo, sendo o segundo tipo mais comum após as barragens de terra (SOUZA, 2013). São adotadas, sobretudo, em locais com fundações rochosas de elevada resistência, onde sua estrutura maciça e de baixa deformabilidade pode ser implantada com segurança. Esse tipo de estrutura é especialmente indicado para vales estreitos e profundos, em que as condições topográficas favorecem o uso de seções verticais e o controle eficiente do fluxo hidráulico (LADEIRA, 2020; CBDB, 2011).

Dentre os diversos tipos, destacam-se as barragens de gravidade, arco e contraforte. A barragem de gravidade é a mais utilizada entre as de concreto, caracterizando-se por um corpo monolítico, cuja estabilidade se dá principalmente pelo peso próprio. Já a barragem de arco se aproveita da geometria curva para transferir os esforços laterais da água para as margens do vale. Por sua vez, a barragem de contraforte possui apoios verticais que reduzem o volume de

concreto necessário, sendo adotada em projetos específicos com exigências estruturais distintas (ALMEIDA, 2010; CBDB, 2011).

Conforme ilustrado na Figura 4, os principais tipos estruturais de barragens de concreto variam quanto à geometria e ao sistema de suporte, influenciando diretamente na forma como os esforços hidráulicos são absorvidos e redistribuídos. A barragem de gravidade utiliza o próprio peso como principal elemento de equilíbrio; a de contraforte, por sua vez, emprega pilares ou contrafortes para dar sustentação à face de concreto; enquanto as barragens em arco transferem os esforços horizontais para as margens do vale, otimizando o uso de materiais (TERZAGHI *et al.*, 2000, *apud* IGEOLÓGICO, 2024).

Figura 4 – Tipos estruturais de barragens de concreto.



Fonte: TERZAGHI *et al.* (2000) *apud* IGEOLÓGICO (2024).

A principal vantagem das barragens de concreto é a elevada resistência e durabilidade, associadas à sua rigidez estrutural e desempenho hidráulico. No entanto, sua baixa tolerância a deformações diferenciais exige fundações homogêneas e controle rigoroso durante a execução, especialmente em trechos com contato direto com o solo ou estruturas de transição (LADEIRA,

2020; MASSAD, 2010). Além disso, os custos de construção tendem a ser superiores aos de barragens de terra, exigindo mão de obra especializada e maior controle tecnológico (ALMEIDA, 2010).

2.1.5. Barragens de Rejeitos

As barragens de rejeitos são estruturas construídas com a finalidade específica de armazenar os resíduos resultantes do beneficiamento de minérios, especialmente em atividades de mineração. Ao contrário das barragens de água, essas estruturas lidam com materiais de alta carga sólida, muitas vezes finos, com baixa permeabilidade e características geotécnicas distintas, o que exige cuidados específicos quanto à estabilidade e ao controle de percolação (SILVA, 2016).

Esse tipo de barragem apresenta uma diversidade de métodos construtivos, sendo os mais comuns o alteamento a montante, a jusante e por linha de centro. O método a montante, embora mais econômico, apresenta riscos mais elevados, uma vez que os novos diques são construídos sobre o próprio rejeito previamente depositado, que pode não estar completamente consolidado. Já o alteamento a jusante é considerado mais seguro, pois os diques subsequentes são construídos sobre material compactado e previamente estruturado. O método por linha de centro representa uma solução intermediária, com diques alinhados com a crista da estrutura original (FELL *et al.*, 2003).

Além da técnica construtiva, a forma como o rejeito é disposto influencia diretamente na segurança da estrutura. Fatores como segregação de partículas, presença de finos, variações de umidade e drenagem deficiente podem levar ao surgimento de fenômenos de instabilidade hidráulica, especialmente o *piping*, que é uma das principais causas de rupturas em barragens desse tipo (FOSTER *et al.*, 2000; FELL *et al.*, 2003).

Devido à heterogeneidade do material depositado, à variabilidade no modo de operação e à evolução da estrutura ao longo do tempo, a modelagem numérica dessas barragens demanda atenção especial. A correta definição de parâmetros hidráulicos, a representação do alteamento progressivo e a simulação do fluxo interno são fundamentais para prever cenários de instabilidade e avaliar o risco de erosão interna de forma eficiente. Por esses motivos, as barragens de rejeitos assumem papel central em estudos de segurança de barragens no Brasil, especialmente após os desastres registrados em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que evidenciaram a necessidade de monitoramento e projeto com alto rigor técnico (SILVA, 2016; LADEIRA, 2020).

A Figura 5 apresenta uma barragem de rejeitos localizada em Ouro Preto/MG, representando o tipo de estrutura frequentemente associado a riscos de instabilidade hidráulica, especialmente quando não há controle rigoroso sobre os métodos de alteamento e disposição do rejeito.

Figura 5 – Barragem de rejeitos localizada no distrito de Antônio Pereira em Ouro Preto/MG.



Fonte: MAGNO, Fred. *O Tempo* (2024).

Vale destacar que, em decorrência dos rompimentos das barragens de Fundão (Mariana) e Córrego do Feijão (Brumadinho), o método de alteamento a montante foi legalmente proibido no Brasil. A Resolução nº 13/2019 da Agência Nacional de Mineração (ANM) vedou a construção de novas barragens com esse método e determinou a descaracterização das estruturas existentes até o ano de 2027. Posteriormente, essa determinação foi ratificada pela Lei nº 14.066/2020, consolidando a proibição em âmbito federal. Tais medidas refletem a necessidade de um rigor ainda maior nas práticas de engenharia, especialmente no que diz respeito à contenção de rejeitos e aos riscos associados à erosão interna (ANM, 2019; BRASIL, 2020).

2.2. EROSÃO INTERNA (*PIPING*) EM BARRAGENS

A erosão interna, ou *piping*, é um dos principais fatores de falha em barragens de terra e enrocamento. Esse fenômeno ocorre quando partículas do solo são carregadas pela percolação da água, criando canais internos que podem levar ao colapso estrutural (FELL *et al.*, 2003).

A ruptura por *piping* pode ocorrer de forma regressiva, partindo da jusante para o montante, com formação progressiva de um canal interno (LADEIRA, 2020). Essa progressão pode ser dividida em quatro fases principais: início, continuação, progressão e colapso, sendo a fase final marcada pela formação de uma brecha que resulta na liberação incontrolada da água armazenada (FOSTER *et al.*, 1998).

A compreensão do fenômeno de erosão interna é essencial para a segurança das barragens. Nesse contexto, a modelagem numérica tem se mostrado uma ferramenta poderosa para analisar e prever a ocorrência desse fenômeno. Através de técnicas de modelagem, como as aplicadas no GeoStudio, é possível simular diferentes cenários, permitindo avaliar o comportamento do solo e a evolução do canal de erosão (SEEQUENT, 2023; FELL *et al.*, 2003).

2.2.1. Principais fases da erosão interna

A erosão interna, ou *piping*, é um processo progressivo que ocorre quando partículas do solo são removidas pela ação da percolação da água, podendo evoluir silenciosamente até causar o colapso da estrutura. Estudos clássicos descrevem sua evolução em quatro fases distintas: início, continuação, progressão e colapso (FOSTER *et al.*, 1998; FELL *et al.*, 2003). A seguir, são apresentados os principais mecanismos e características de cada uma dessas fases, fundamentais para a compreensão da instabilidade provocada pelo *piping* em barragens de terra e enrocamento.

2.2.1.1. Início

A fase inicial da erosão interna tem início quando a água começa a percolar através do solo da barragem, provocando o arraste de partículas finas do material constitutivo. Nesse estágio, formam-se pequenos canais de escoamento dentro do maciço, ainda localizados e discretos, que geralmente não representam risco imediato à estabilidade da estrutura. Contudo, se não for devidamente controlada, a erosão tende a evoluir, ampliando os condutos e agravando o quadro de instabilidade. Essa fase é frequentemente silenciosa, ocorrendo sem manifestações visíveis na superfície da barragem, o que dificulta sua detecção, sobretudo em estruturas de grande porte, onde o controle da percolação é mais desafiador (FELL *et al.*, 2003).

2.2.1.2. Continuação

Na fase de continuação, a erosão interna se intensifica com a manutenção do fluxo de percolação através do maciço da barragem. Os canais inicialmente formados se ampliam de

forma progressiva, e a remoção de partículas finas se torna mais significativa. Esse processo favorece a definição de caminhos preferenciais para o escoamento, que tendem a se conectar com outras zonas internas da estrutura. Essa fase é marcada pela formação de condutos contínuos, pelo aumento da condutividade hidráulica local e pela possível saturação de camadas adjacentes, criando um ambiente que acelera ainda mais a erosão. O fluxo se torna mais direcionado, e a pressão da água contribui para a abertura de novos trajetos internos, muitas vezes sem qualquer manifestação superficial aparente (FELL *et al.*, 2003).

2.2.1.3. Progressão

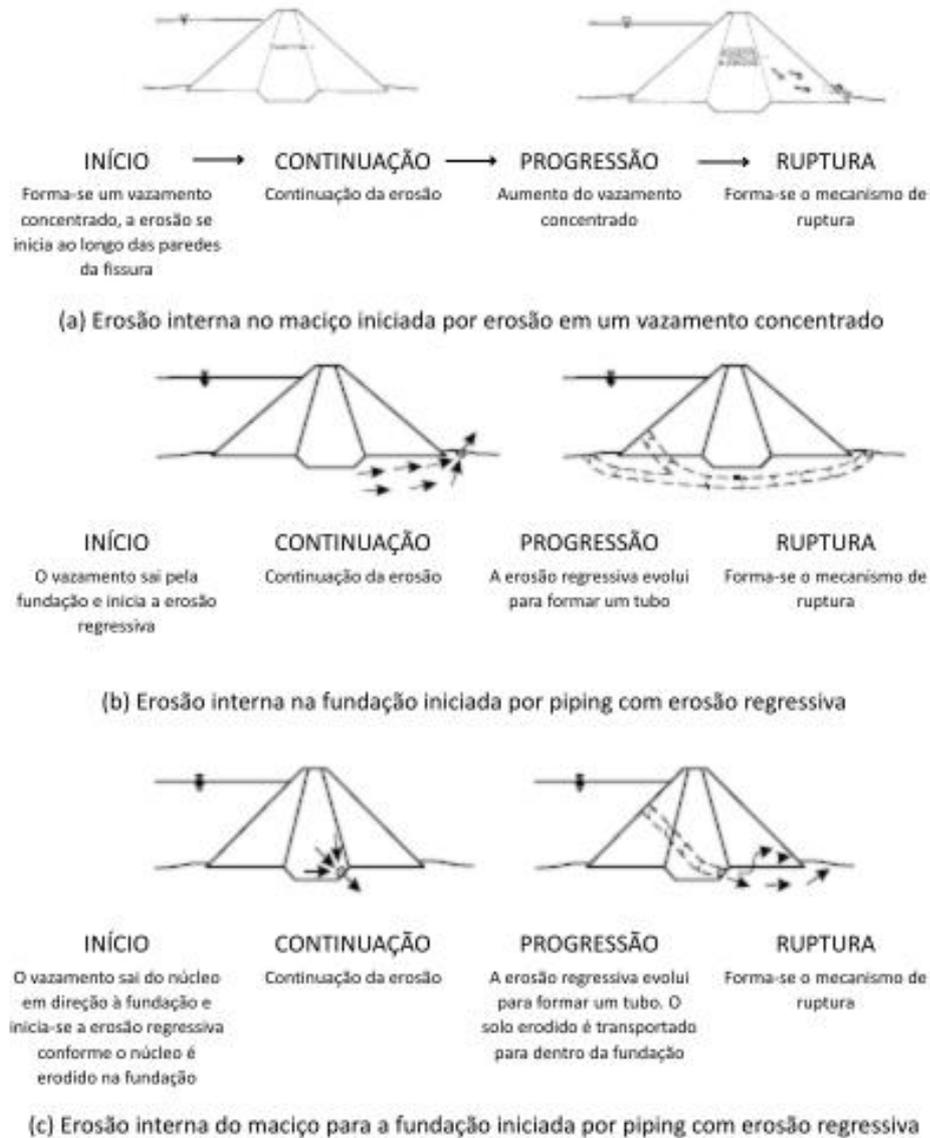
Na fase de progressão, os condutos internos formados nas etapas anteriores se expandem de forma mais acelerada e agressiva, à medida que o fluxo de percolação ganha velocidade e volume. A erosão passa a atingir camadas mais profundas do maciço, comprometendo zonas críticas da estrutura e gerando caminhos preferenciais bem definidos. O canal de erosão pode se estender por longas distâncias dentro da barragem, afetando de maneira significativa a integridade da fundação e das zonas de transição. Essa fase é considerada crítica, pois o aumento da velocidade do fluxo e a intensificação do arraste de partículas tornam o processo praticamente irreversível, elevando significativamente o risco de ruptura (FELL *et al.*, 2003).

2.2.1.4. Colapso

A fase de colapso representa o estágio final da erosão interna, no qual os canais formados ao longo do processo atingem proporções críticas e comprometem de maneira irreversível a integridade estrutural da barragem. A estrutura perde sua capacidade de conter o reservatório de forma eficaz, e o fluxo se intensifica rapidamente, formando grandes brechas no maciço. Esse estágio é caracterizado pela liberação incontrolada da água armazenada, geralmente acompanhada de uma ruptura progressiva e violenta. Trata-se da fase mais perigosa do fenômeno, pois a erosão deixa de ser controlável e resulta, na maioria dos casos, na falha completa da estrutura, com consequências potencialmente catastróficas (FELL *et al.*, 2003).

A Figura 6 apresenta três mecanismos distintos de desenvolvimento do *piping*: por erosão concentrada, por erosão regressiva na fundação e por erosão iniciada no núcleo da barragem. Cada um deles segue as quatro fases principais do processo — início, continuação, progressão e colapso — e demonstra como diferentes configurações construtivas e falhas de projeto podem influenciar no modo de evolução da falha por erosão interna (FOSTER; FELL, 1999).

Figura 6 – Modelos para o desenvolvimento da falha por erosão interna, representando as fases de início, continuação, progressão e colapso.



Fonte: Adaptado de FOSTER; FELL (1999, p. 379).

2.2.2. Mecanismos de *piping*

A erosão interna pode ocorrer por meio de diferentes mecanismos, os quais variam conforme as características do solo, as condições hidráulicas e a geometria da estrutura. O entendimento desses mecanismos é essencial para prevenir falhas estruturais e garantir a

segurança de barragens (FELL *et al.*, 2003). Dentre os fatores que influenciam o *piping*, destacam-se:

2.2.2.1. Pressão Hidrostática

A poropressão gerada pela água que percola em meios saturados pode ser responsável pela mobilização de partículas finas do solo. Quando a poropressão supera as forças de coesão e o atrito entre os grãos, inicia-se o processo erosivo. Em solos com baixa resistência e alta saturação, o risco de *piping* aumenta significativamente, especialmente na ausência de filtros ou zonas de transição adequadas (FELL *et al.*, 2003).

2.2.2.2. Gradiente Hidráulico

O gradiente hidráulico elevado atua como força motriz da erosão interna, sendo um dos principais parâmetros de risco em estudos de segurança de barragens. Fell *et al.* (2003) destacam que, quando o gradiente excede valores críticos, há potencial para o arraste de partículas, especialmente em solos granulares mal graduados ou mal compactados.

2.2.2.3. Características do Solo

A suscetibilidade ao *piping* depende diretamente da composição e estrutura do solo. Solos finos, como siltes e argilas dispersivas, são mais vulneráveis à erosão quando comparados a solos granulares bem compactados. A presença de partículas finas em elevada proporção, baixa coesão e permeabilidade elevada favorece a formação de condutos internos, principalmente na ausência de barreiras hidráulicas como filtros e drenos (FELL *et al.*, 2003).

2.2.2.4. Fluxo de percolação como agente inicial

O fluxo de percolação é o fenômeno físico que estabelece as condições iniciais para o desencadeamento dos mecanismos de *piping*. Esse escoamento ocorre devido à diferença de carga hidráulica entre montante e jusante da estrutura e é regido pela equação de Darcy, a qual relaciona a velocidade do fluxo à condutividade hidráulica do solo e ao gradiente hidráulico aplicado (FELL *et al.*, 2014; SEQUENT, 2023). Em barragens de terra e rejeitos, a presença de zonas de maior permeabilidade, descontinuidades ou materiais mal compactados pode direcionar o fluxo para trajetórias preferenciais, gerando concentrações localizadas de poropressão e aumento dos esforços de arraste. Esse processo cria um ambiente propício à mobilização de partículas finas, especialmente na ausência de filtros ou zonas de transição

eficientes, tornando-se o fator desencadeador da erosão interna. O fluxo, portanto, não apenas antecede os demais mecanismos descritos, como também os condiciona, funcionando como elo de conexão entre a pressão hidrostática, os gradientes hidráulicos e as características do solo. Sua análise é essencial para prever e mitigar riscos de instabilidade hidráulica em projetos de barragens.

2.2.3. Tipos de *piping*

Os diferentes tipos de *piping* são classificados com base no comportamento do solo e nas interações entre partículas e fluxos de água. Esses tipos determinam a vulnerabilidade da barragem e as estratégias necessárias para a sua prevenção:

2.2.3.1. Sufusão

A sufusão é caracterizada pela remoção seletiva de partículas finas do solo, como argilas e siltes, sem comprometer a estrutura granular mais coesa. Esse fenômeno ocorre quando a água percola através da barragem, transportando as partículas menores, enquanto as maiores, como areia e cascalho, permanecem no lugar. Embora a sufusão não cause falhas imediatas, ela pode reduzir a coesão do solo ao longo do tempo, enfraquecendo progressivamente a fundação da barragem e facilitando a formação de canais internos, o que pode comprometer sua estabilidade estrutural. Este tipo de erosão interna é importante de ser monitorado, pois sua progressão gradual pode levar a falhas imprevistas (FELL *et al.*, 2003).

2.2.3.2. Erosão regressiva

A erosão regressiva é um processo no qual os canais de erosão se formam no sentido contrário ao fluxo da água, ou seja, da jusante para o montante. Esse tipo de erosão ocorre quando a percolação da água remove as partículas do solo, criando canais internos que avançam contra o fluxo de água. A erosão regressiva é particularmente preocupante, pois sua progressão pode ser difícil de detectar no início, permitindo que os canais de erosão se expandam ao longo do tempo e comprometam a integridade da barragem. A formação desses canais, ao avançarem contra o fluxo, pode eventualmente levar à falha da estrutura, causando danos significativos (FOSTER *et al.*, 1998).

2.2.3.3. Erosão por contato

A erosão por contato é observada quando há interação entre materiais distintos, como o solo e o concreto, facilitando a movimentação de partículas e iniciando o processo de erosão

interna. Esse tipo de *piping* é comum em barragens de terra que possuem revestimentos de concreto, onde a água percola entre o solo e a superfície de concreto, removendo partículas finas da interface entre esses materiais. A erosão por contato pode ser crítica, especialmente em barragens de fundação mista, em que a falha na interface entre o solo e o concreto pode resultar na formação de canais internos, prejudicando a estabilidade e a segurança da barragem (FELL *et al.*, 2003).

2.2.3.4. Erosão capilar

A erosão capilar, também chamada de *heave* ou levante hidráulico, ocorre quando a poropressão se torna suficientemente elevada para superar o peso efetivo do solo, provocando a ascensão vertical do material e sua desagregação. Esse tipo de *piping* é mais comum em fundações arenosas e finas, especialmente em regiões próximas ao pé de jusante da barragem, onde o gradiente hidráulico vertical pode se intensificar. A ruptura por levante hidráulico pode ocorrer mesmo sem a formação de canais visíveis, sendo considerada uma forma silenciosa, porém extremamente perigosa de erosão interna. A presença de filtros adequados e a limitação do gradiente vertical são as principais estratégias de mitigação desse tipo de falha (FELL *et al.*, 2003).

2.2.4. Métodos de Detecção e Monitoramento

A detecção e o monitoramento da erosão interna em barragens constituem etapas fundamentais para a prevenção de falhas estruturais. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas com o objetivo de identificar precocemente os sinais de instabilidade, possibilitando a adoção de medidas corretivas antes que o processo evolua para situações críticas (FELL *et al.*, 2003; FOSTER *et al.*, 1998).

A instrumentação geotécnica é um dos métodos mais tradicionais e eficazes. O uso de piezômetros permite acompanhar a variação dos níveis de água e da poropressão ao longo do maciço, fornecendo indícios da presença de fluxos anômalos que podem estar associados à erosão interna (FELL *et al.*, 2003; PIMENTA FILHO, 2013). Esses dispositivos oferecem monitoramento contínuo e quantitativo das condições hidráulicas internas da barragem.

Outra abordagem relevante é o monitoramento acústico, que consiste na instalação de sensores capazes de registrar microvibrações e ruídos gerados pela movimentação de partículas no interior do solo. Variações nesses sinais podem indicar a formação ou progressão de canais erosivos, sendo, portanto, uma técnica promissora para o alerta precoce (FOSTER *et al.*, 1998;

ALMEIDA, 2010). O monitoramento do fluxo de água, especialmente por meio de análises de turbidez e coloração em drenos e galerias, também se mostra eficaz. O aumento da turbidez pode indicar o arraste de partículas finas, sugerindo o início do *piping* ou a evolução de processos erosivos já iniciados (FELL *et al.*, 2003).

Além desses, os métodos geofísicos não invasivos vêm sendo cada vez mais aplicados na engenharia de barragens. Técnicas como a tomografia de resistividade elétrica (ERT), a sísmica de refração e o GPR (*Ground Penetrating Radar*) permitem identificar zonas de saturação anormal, vazios internos e alterações na estrutura do maciço. Essas técnicas auxiliam na identificação de anomalias sem comprometer a integridade da estrutura, sendo especialmente úteis em áreas onde a instalação de instrumentos convencionais é limitada (FELL *et al.*, 2003; PIMENTA FILHO, 2013).

Quando aplicados de forma integrada, esses métodos constituem um sistema robusto de detecção e monitoramento, proporcionando uma visão abrangente do comportamento da barragem ao longo do tempo. A capacidade de identificar alterações sutis e antecipar a evolução de processos erosivos internos é essencial para a segurança das estruturas hidráulicas e para a mitigação de riscos ambientais e sociais associados à sua ruptura (FELL *et al.*, 2003; PIMENTA FILHO, 2013).

2.2.5. Análise histórica

A análise de falhas históricas em barragens é fundamental para compreender os efeitos da erosão interna (*piping*) e as condições que favorecem sua ocorrência. Estudos documentados demonstram como diferentes fatores estruturais, geotécnicos e ambientais podem contribuir para a ruptura dessas estruturas, muitas vezes com consequências catastróficas. A avaliação de casos reais fornece subsídios importantes para o aprimoramento de projetos, critérios de segurança e estratégias de monitoramento (FELL *et al.*, 2003; CBDB, 2011). A seguir, apresentam-se alguns dos casos relevantes de falhas associadas ao *piping*, organizados cronologicamente, com destaque para os mecanismos envolvidos e as lições aprendidas a partir de cada evento.

2.2.5.1. Barragem Baldwin Hills (1963)

A barragem de Baldwin Hills, localizada na Califórnia (EUA), foi construída entre 1947 e 1951 com o objetivo de fornecer água potável para Los Angeles. Após 12 anos de operação, em 1963, ocorreu sua ruptura total devido a um processo de *piping* originado na fundação da

estrutura. A barragem era composta por solo residual dispersivo, o que a tornava suscetível à percolação de água e à subsequente perda de partículas finas, favorecendo a progressão da erosão regressiva (LADEIRA, 2020).

Estudos indicam que recalques diferenciais e movimentos associados a falhas geológicas, além da injeção de fluidos subterrâneos provenientes de atividades petrolíferas na região, podem ter contribuído para acelerar o processo de instabilização. A falha resultou na formação de um canal interno de escoamento, o qual enfraqueceu a estrutura até provocar seu colapso. Apesar da gravidade do evento, o sistema de monitoramento foi eficaz e permitiu a evacuação da área antes da ruptura, evitando perdas humanas. O caso ressaltou a importância do conhecimento aprofundado da fundação e da implantação de sistemas de monitoramento preventivo (LADEIRA, 2020).

A Figura 7, apresentada a seguir, mostra o aspecto da Barragem Baldwin Hills após sua ruptura em 1963, evidenciando os efeitos devastadores associados à falha por *piping* e a importância das medidas preventivas no projeto e na operação de barragens.

Figura 7 – Vista da Barragem Baldwin Hills (Califórnia, EUA) após sua ruptura em 14 de dezembro de 1963.



Fonte: ASDSO (2023).

2.2.5.2. Colapso da Barragem de Teton (1976)

A barragem de Teton, localizada no estado de Wyoming (EUA), foi projetada para fins de irrigação, controle de cheias e geração de energia. A estrutura de enrocamento com núcleo

de solo argiloso possuía aproximadamente 93 metros de altura e volume útil de 356 hm³. A falha ocorreu em 5 de junho de 1976, durante o primeiro enchimento do reservatório, e está entre os casos mais emblemáticos de ruptura por erosão interna documentados (LADEIRA, 2020).

Três surgências de água limpa foram observadas na ombreira direita, o que indicava a presença de erosão interna ativa. Em poucas horas, essas surgências evoluíram para fluxos turvos e pressurizados, caracterizando claramente a progressão do *piping*. A ombreira direita da barragem estava assentada sobre rochas fraturadas (riolitos, tufos e basaltos), e falhas no tratamento da fundação permitiram a percolação ao longo dessas discontinuidades, sem a devida transição de material entre a fundação e o núcleo de solo (LADEIRA, 2020). A ruptura provocou 11 mortes e cerca de 25.000 pessoas ficaram desabrigadas. Este evento reforça a necessidade de atenção especial ao tratamento de fundações e à verificação dos critérios de filtragem e compactação em barragens de terra (LADEIRA, 2020).

A Figura 8 a seguir registra o momento exato da ruptura da Barragem de Teton, evidenciando a magnitude do colapso e os impactos causados pela falha no controle da percolação. A imagem reforça a importância de medidas preventivas relacionadas à fundação e filtragem em estruturas de terra.

Figura 8 - Momento da ruptura da Barragem de Teton em 1976.



Fonte: PONCE, V. M. (2023).

2.2.5.3. Ruptura do Dique Quail Creek (1988)

O dique Quail Creek, localizado no estado de Utah (EUA), foi construído em 1984 para contenção de água de irrigação e recreação, com cerca de 24 metros de altura. Em 1988, apenas quatro anos após sua construção, o dique sofreu ruptura total devido ao desenvolvimento de erosão interna (*piping*) que teve origem na fundação rochosa fraturada da estrutura (LADEIRA, 2020).

A fundação era composta por rochas com fraturas preenchidas por material erodível, o que favoreceu a percolação da água e a remoção progressiva de finos. A barragem possuía um sistema zoneado, mas a ausência de proteção adequada nas interfaces com a fundação permitiu a formação de trajetos preferenciais para o fluxo, culminando na criação de um túnel interno que colapsou. A ruptura causou danos materiais expressivos, incluindo a destruição de 50 casas, 100 apartamentos, um gasoduto e uma pequena barragem a jusante (LADEIRA, 2020). O caso evidenciou a importância da caracterização geológica detalhada da fundação e da implementação de filtros eficazes em zonas críticas da estrutura.

A Figura 9 ilustra o aspecto do dique Quail Creek após sua ruptura em 1988, revelando os danos significativos resultantes do *piping* e reforçando a necessidade de atenção às interfaces entre fundação e núcleo em barragens de terra.

Figura 9 – Vista da ruptura do Dique Quail Creek (Utah, EUA) em 1989.



Fonte: ASDSO (2023).

2.2.5.4. Rompimento da Barragem de Fundão – Dique 1 (2015)

A barragem de Fundão, localizada no município de Mariana, Minas Gerais, sofreu um rompimento em 5 de novembro de 2015, provocando um dos maiores desastres socioambientais do Brasil. Embora a falha principal tenha ocorrido por liquefação dos rejeitos de areia (*sand*

tailings), o relatório oficial identificou um incidente prévio de erosão interna (*piping*) ocorrido entre 2009 e 2010, relacionado ao Dique 1, que comprometeu seriamente o sistema de drenagem de base da estrutura. Após o início da operação, observou-se intenso fluxo de água com carreamento de finos na face jusante do dique, caracterizando indícios clássicos de *piping*, conforme ilustrado pela erosão da encosta (Mongenstern *et al*, 2016).

O evento foi inicialmente controlado com medidas emergenciais, como rebaixamento do reservatório e construção de bermas. No entanto, os problemas de drenagem persistiram, levando ao abandono do sistema original de drenagem e adoção de soluções paliativas, que acabaram aumentando a saturação dos rejeitos e, por consequência, a vulnerabilidade à liquefação. Segundo o painel de investigação, esse incidente de erosão interna foi um dos primeiros marcos críticos da cadeia de eventos que culminaria, anos depois, na falha geral da barragem (Mongenstern *et al*, 2016).

Embora o colapso final tenha sido desencadeado por liquefação, a ocorrência de *piping* no Dique 1 representa um exemplo real e documentado de como a erosão interna pode iniciar processos degradantes em estruturas de contenção, evidenciando a importância de inspeções rigorosas, manutenção preventiva e verificação contínua da integridade dos sistemas de drenagem.

Figura 10 – Vista aérea da trilha de destruição provocada pelo rompimento da barragem de Fundão (Mariana/MG), ocorrido em 5 de novembro de 2015.



Fonte: Estado de Minas (2015).

2.2.5.5. Ruptura da Barragem de Rejeitos em Chambishi, Zâmbia (2025)

No dia 18 de fevereiro de 2025, ocorreu a falha catastrófica de uma estrutura de contenção de rejeitos pertencente à mineradora Sino-Metals Leach Zambia, localizada na cidade de Chambishi, província de Copperbelt, Zâmbia. O evento resultou na liberação de aproximadamente 50 milhões de litros de efluentes altamente ácidos e contaminados no rio Kafue, um dos principais cursos d'água do país, afetando o abastecimento de água, a agricultura e a biodiversidade de uma ampla região (MINING.COM, 2025).

Segundo análise técnica publicada por Petley (2025), a ruptura inicial ocorreu na parede divisória entre dois compartimentos superiores do sistema de disposição de rejeitos. Acredita-se que a causa primária tenha sido um processo de erosão interna (*piping*) ao longo da fundação da parede recém-construída. Esse *piping* permitiu o rápido fluxo de água do compartimento ativo para um compartimento inativo, sem capacidade hidráulica adequada, resultando em uma sobrecarga crítica que causou o transbordamento da estrutura. Em seguida, os compartimentos inferiores também foram afetados, culminando em uma falha em cascata que mobilizou grandes volumes de sólidos (EOS, 2025).

O impacto ambiental foi imediato e devastador: centenas de toneladas de peixes mortos foram observadas no leito do rio Kafue, e comunidades inteiras ficaram sem acesso seguro à água potável. Como medida emergencial, a Força Aérea da Zâmbia lançou toneladas de cal ao longo do curso do rio para reduzir a acidez das águas. Além disso, o governo zambiano responsabilizou formalmente a mineradora, suspendendo suas atividades e determinando o custeio integral das ações de contenção, limpeza e mitigação dos danos (MINING.COM, 2025).

O caso de Chambishi é emblemático por demonstrar, mais uma vez, como o *piping* pode atuar como gatilho inicial de falhas catastróficas em barragens de rejeitos. O evento reforça a necessidade de atenção especial ao controle de percolação, à estabilidade de estruturas internas e à previsão de mecanismos de falha complexos, especialmente em sistemas compartimentados que armazenam grandes volumes de material fino e saturado (EOS, 2025).

A Figura 10, apresentada a seguir, mostra a extensão dos danos causados pelo rompimento da Barragem de Fundão, ilustrando o impacto de falhas progressivas que têm início com processos como a erosão interna. A imagem reforça a gravidade do evento e a necessidade de atenção constante às condições de drenagem e estabilidade estrutural.

Figura 11 – Vista aérea da área afetada pela ruptura da barragem de rejeitos em Chambishi, Zâmbia, ocorrida em 18 de fevereiro de 2025.



Fonte: ADF Magazine (2025).

2.2.6. Consequências do *piping*

As consequências do *piping* vão além da falência estrutural das barragens. O fluxo descontrolado de água, associado à erosão interna, pode causar danos irreversíveis à estrutura, ao meio ambiente e às comunidades a jusante. Quando o processo evolui sem controle, os canais internos de erosão ampliam-se progressivamente, até que se formam brechas que comprometem a estabilidade geral da barragem, podendo provocar uma liberação repentina e incontrolada de grandes volumes de água, com inundações devastadoras (FELL *et al.*, 2014; LADEIRA, 2020).

Além dos danos estruturais, as consequências sociais de uma falha por *piping* são severas. Em diversos casos registrados, como os da barragem de Fundão (2015) e do Dique Quail Creek (1988), houve perdas humanas, deslocamento de populações, destruição de moradias e comprometimento de infraestruturas essenciais (LADEIRA, 2020; MONGENSTERN *et al.*, 2016). Esses eventos mostram que o impacto vai muito além da ruptura física da estrutura.

Sob a perspectiva ambiental, o *piping* pode desencadear contaminação em larga escala. A liberação de partículas finas, sedimentos e, em alguns casos, rejeitos industriais nos corpos hídricos, compromete a qualidade da água e afeta diretamente os ecossistemas aquáticos e terrestres. A biodiversidade é afetada, e os processos de restauração ambiental tornam-se lentos e dispendiosos (LADEIRA, 2020; ZANON, 2020).

A rapidez com que a erosão interna pode evoluir para uma falha catastrófica reforça a necessidade de sistemas de monitoramento eficazes. A instrumentação de barragens com piezômetros, filtros com drenos acessíveis, controle da turbidez da água drenada e análises de poropressão são algumas das práticas recomendadas na literatura técnica (FELL *et al.*, 2014). A ausência de medidas preventivas e de resposta pode agravar os efeitos do fenômeno, comprometendo a segurança da estrutura e da população.

Assim, as consequências do *piping* não se restringem aos aspectos geotécnicos. Trata-se de um fenômeno com desdobramentos amplos, exigindo compreensão profunda, planejamento preventivo e atuação constante para mitigar os riscos associados ao seu desenvolvimento.

2.2.7. Estratégias de Mitigação

A mitigação do *piping* é uma prioridade para garantir a segurança das barragens, uma vez que o processo de erosão interna pode levar a falhas catastrólicas se não for controlado. Fell *et al.* (2014) apresentam diversas abordagens para prevenir e mitigar os efeitos do *piping*, tanto no projeto quanto no monitoramento contínuo das estruturas. A seguir, são descritas algumas das principais estratégias discutidas na literatura.

2.2.7.1. Monitoramento e Inspeção Regular

O monitoramento contínuo é essencial para detectar precocemente sinais de *piping*. De acordo com Fell *et al.* (2014), a instalação de piezômetros, medidores de vazão e dispositivos de controle de turbidez são instrumentos indispensáveis para observar a pressão de poros e variações anômalas que possam indicar instabilidade. Além disso, inspeções visuais frequentes, principalmente em zonas permeáveis ou tratadas com injeções, permitem identificar surgimento de trincas, rebaixamento de terreno ou surgimento de água turva, que são indícios clássicos de erosão interna (ZANON, 2020).

2.2.7.2. Tratamento de Fendas e Impermeabilização

O tratamento de fendas por meio de injeções de calda cimentícia (*grouting*) é amplamente recomendado para fundações com presença de fraturas ou descontinuidades. Essas técnicas reduzem a percolação de água por caminhos preferenciais e, conseqüentemente, minimizam os riscos de formação de caminhos erosivos. Fell *et al.* (2014) enfatizam que a impermeabilização, por meio de tapetes vedantes ou cortinas de impermeabilização, é crucial em fundações heterogêneas ou de alta condutividade hidráulica (CRUZ, 2004).

2.2.7.3. Projeto Adequado da Fundação e Corpo da Barragem

Um projeto bem executado é a base para evitar a formação de *piping*. Segundo Fell *et al.* (2014), o uso de materiais com adequada compatibilidade granulométrica, aliada a uma compactação eficiente, reduz significativamente o risco de instabilidades internas. O dimensionamento de filtros e drenos com critérios de retenção e permeabilidade adequados também é essencial para a segurança hidráulica da estrutura (FELL *et al.*, 2014; LADEIRA, 2020).

2.2.7.4. Uso de Técnicas de Reforço Estrutural

Técnicas de reforço com geossintéticos, como geogrelhas e geotêxteis, vêm sendo cada vez mais utilizadas em barragens de terra e estruturas de contenção. Esses materiais aumentam a resistência ao cisalhamento e ajudam a redistribuir as tensões no interior da barragem, reduzindo o risco de formação de caminhos erosivos (QUISPE, 2008 *apud* TORRES, 2022). Além disso, os geossintéticos apresentam elevada durabilidade, resistência à tração e fácil adaptação a diferentes geometrias.

2.2.7.5. Modelagem Numérica e Simulações

A modelagem numérica é uma ferramenta fundamental para prever o comportamento hidráulico e estrutural de barragens. Por meio de *softwares* como o GeoStudio e seu módulo SEEP/W, é possível simular a distribuição de poropressão, a posição da linha freática e os gradientes hidráulicos, identificando com antecedência os locais mais suscetíveis à ocorrência de *piping* (FELL *et al.*, 2014; SEEQUENT, 2023). Essa abordagem permite análises preditivas que contribuem diretamente para o planejamento de medidas corretivas e preventivas mais eficazes.

2.3. MODELAGEM NÚMÉRICA APLICADA À ENGENHARIA GEOTÉCNICA

2.3.1. Introdução à Modelagem Numérica

A modelagem numérica é uma ferramenta amplamente empregada na engenharia geotécnica, pois permite simular e prever o comportamento de solos, rochas e estruturas de contenção sob diversas condições. Com o avanço dos métodos computacionais, essas

simulações tornaram-se fundamentais para o projeto, análise e segurança de estruturas complexas, como barragens, túneis, taludes e fundações profundas (FELL *et al.*, 2014; SEEQUENT, 2023).

De acordo com Potts e Zdravkovic (2001), a modelagem numérica permite a compreensão detalhada dos processos físicos envolvidos nas interações solo-estrutura, oferecendo uma alternativa aos métodos empíricos e experimentais, que muitas vezes são limitados pela escala ou pelas condições específicas dos testes. As técnicas de modelagem numérica podem reproduzir condições reais de maneira controlada, ajustando variáveis como tensões, pressões e deslocamentos para prever o desempenho das estruturas.

2.3.2. Fundamentos da Modelagem Numérica

A modelagem numérica consiste na representação de sistemas físicos complexos por meio de modelos matemáticos discretizados e resolvidos numericamente. Essa técnica permite simular o comportamento de estruturas geotécnicas sob diferentes condições de carregamento, contribuindo para o entendimento e a previsão de fenômenos como a deformação de maciços, o fluxo de água em meios porosos e a evolução de instabilidades (SEEQUENT, 2023; ZANON, 2020). As principais abordagens utilizadas na engenharia geotécnica incluem o Método dos Elementos Finitos (FEM), o Método das Diferenças Finitas (FDM) e o Método dos Elementos Discretos (DEM), cada qual com características específicas que orientam sua aplicação conforme a complexidade do problema analisado (FELL *et al.*, 2014; TORRES, 2022).

2.3.2.1. Método dos Elementos Finitos (FEM)

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é amplamente utilizado na modelagem de barragens, taludes e fundações, pois permite a simulação de meios heterogêneos e anisotrópicos, como os solos compactados (POTTS; ZDRAVKOVIĆ, 1999). Esse método subdivide o domínio de análise em pequenos elementos interligados, em que as equações diferenciais que regem o comportamento do sistema são resolvidas numericamente.

De acordo com a Seequent (2023), o FEM é eficaz na análise de deformações, poropressões, tensões e fatores de segurança. A flexibilidade do método é destacada por sua capacidade de lidar com geometrias irregulares, variações de material e condições de contorno complexas. Em ambientes computacionais como o SEEP/W e o SIGMA/W, integrados no GeoStudio, o FEM é amplamente empregado em análises de fluxo e estabilidade em estruturas geotécnicas.

2.3.2.2. Método das Diferenças Finitas (FDM)

O Método das Diferenças Finitas (FDM) baseia-se na aproximação das equações diferenciais parciais por meio de expressões algébricas simples, aplicadas sobre uma malha regular de pontos no domínio analisado (POTTS; ZDRAVKOVIĆ, 1999; FELL *et al.*, 2014). Segundo Foster *et al.* (1998), essa abordagem é bastante eficiente na resolução de problemas relacionados ao fluxo de água e ao transporte de calor, especialmente em meios porosos como os encontrados em fundações de barragens.

Apesar de ser mais simples do ponto de vista computacional, o FDM apresenta limitações para representar geometrias complexas, já que exige uma malha estruturada (FELL *et al.*, 2014). Ainda assim, é bastante utilizado em simulações de percolação e variações de carga hidráulica, especialmente em ambientes acadêmicos ou estudos iniciais de dimensionamento (ZANON, 2020).

2.3.2.3. Método dos Elementos Discretos (DEM)

O Método dos Elementos Discretos (DEM) é indicado para a modelagem do comportamento de materiais particulados, como solos não coesivos ou enrocamentos. Essa abordagem considera as interações entre partículas discretas, permitindo simular deslocamentos, rupturas e redistribuição de tensões no meio granular (FELL *et al.*, 2014).

De acordo com Torres (2022), o DEM é especialmente útil em análises onde a movimentação interna das partículas influencia diretamente o mecanismo de instabilidade, como no caso da erosão interna (*piping*) ou liquefação de camadas de fundação. Quando associado a métodos contínuos como o FEM, o DEM pode complementar a análise estrutural de barragens, oferecendo uma visão microestrutural dos fenômenos em questão.

2.3.3. Aplicações na Engenharia Geotécnica

A modelagem numérica possui ampla aplicação na engenharia geotécnica, proporcionando simulações precisas do comportamento de estruturas sob diferentes condições operacionais. Essa ferramenta permite análises de estabilidade, fluxo, tensão e deformação em projetos como barragens, taludes, fundações e muros de contenção. Com o uso de *softwares* especializados, como o GeoStudio, é possível prever a resposta de sistemas complexos de forma eficiente e segura (SEEQUENT, 2023; FELL *et al.*, 2014; TORRES, 2022).

2.3.3.1. Estabilidade de Taludes

A análise da estabilidade de taludes é uma das aplicações mais tradicionais da modelagem numérica na geotecnia. Ferramentas como o SLOPE/W, módulo do GeoStudio, permitem simular diferentes cenários de carregamento e condições de saturação, viabilizando a identificação de superfícies de ruptura potenciais e a determinação do fator de segurança (SEQUENT, 2023). A integração com dados de campo e laboratoriais proporciona uma base robusta para decisões de projeto e planejamento de medidas mitigadoras (FELL *et al.*, 2014).

2.3.3.2. Avaliação de Barragens

No contexto de barragens, a modelagem numérica é essencial para avaliar o comportamento estrutural e hidráulico, especialmente em relação a fenômenos como a erosão interna (*piping*). Por meio do SEEP/W e SIGMA/W, é possível simular o fluxo d'água no interior do maciço e monitorar a evolução da poropressão ao longo do tempo, contribuindo para identificar zonas críticas à formação de canais erosivos (FELL *et al.*, 2014; SEQUENT, 2023).

Além disso, estudos como o de Torres (2022) mostram que a modelagem pode antecipar cenários de falha e auxiliar no dimensionamento de sistemas de drenagem e reforço estrutural, especialmente em barragens de rejeitos. A capacidade de simular o aumento progressivo de carga sobre a estrutura também contribui para prever o momento crítico de instabilidade e planejar ações preventivas.

2.3.3.3. Fundações e Obras de Contenção

A modelagem numérica também é amplamente empregada na análise de fundações e obras de contenção, como muros de arrimo. O FEM permite avaliar deformações, redistribuição de tensões e interações solo-estrutura com alta precisão (POTTS; ZDRAVKOVIĆ, 1999). Já o Método dos Elementos Discretos (DEM) pode ser usado para simular o comportamento granular de materiais, fornecendo informações detalhadas sobre deslocamentos e falhas por atrito ou colapso interno (FELL *et al.*, 2014).

Segundo Torres (2022), a combinação de diferentes métodos numéricos fornece uma análise mais abrangente, permitindo que os projetos considerem tanto a resposta estrutural quanto os mecanismos internos do solo, resultando em soluções mais seguras e eficazes.

2.3.4. Vantagens e Limitações da Modelagem Numérica

A principal vantagem da modelagem numérica é a capacidade de simular cenários complexos, com alto grau de controle sobre variáveis e condições de contorno. Isso permite prever comportamentos críticos, como a evolução da poropressão, o surgimento de zonas plastificadas ou o deslocamento de superfícies de ruptura (SEEQUENT, 2023; FELL *et al.*, 2014).

O sucesso das análises numéricas está diretamente relacionado à qualidade dos dados de entrada e à correta definição dos parâmetros do modelo. Estudos apontam que a coleta de informações pode ser limitada por restrições técnicas ou financeiras, e que a complexidade computacional dos modelos pode comprometer sua aplicação em tempo real (FELL *et al.*, 2014). Além disso, a calibração com dados reais representa uma das etapas mais críticas do processo, exigindo compatibilidade entre os resultados obtidos e o comportamento observado em campo (TORRES, 2022).

2.4. MODELAGENS 2D E 3D

A modelagem numérica desempenha um papel fundamental na análise de fenômenos geotécnicos complexos, como o *piping* em barragens, por permitir a simulação de diferentes cenários operacionais e condições de contorno. Entre as abordagens mais utilizadas, destacam-se as modelagens bidimensional (2D) e tridimensional (3D), cada uma com características próprias. A escolha entre esses métodos depende de fatores como a complexidade geométrica da estrutura, a variabilidade dos materiais, os objetivos da análise e as limitações relacionadas ao tempo e aos recursos computacionais disponíveis (SEEQUENT, 2023; FELL *et al.*, 2014; POTTS; ZDRAVKOVIĆ, 1999).

2.4.1. Modelagem 2D

A modelagem bidimensional (2D) é amplamente utilizada na engenharia geotécnica devido à sua simplicidade operacional e ao menor custo computacional envolvido. Nesse tipo de modelagem, o sistema é representado em duas dimensões — geralmente comprimento e altura — assumindo-se que a terceira dimensão, correspondente à profundidade, apresenta comportamento uniforme ou desprezível. Esse tipo de abordagem é adequada para problemas onde os efeitos tridimensionais não exercem influência significativa ou quando a geometria da estrutura pode ser simplificada sem comprometer a precisão da análise (SEEQUENT, 2023; POTTS; ZDRAVKOVIĆ, 1999).

Entre as principais vantagens da modelagem 2D, destaca-se a sua eficiência computacional, que permite simulações mais rápidas e a execução de múltiplos cenários em um curto intervalo de tempo. A facilidade de implementação também é um fator positivo, especialmente em contextos onde o conhecimento em modelagem numérica é mais limitado, uma vez que a configuração de geometrias e malhas é relativamente simples. Além disso, para problemas geotécnicos considerados unidimensionais ou com baixa variação ao longo da largura, como em casos de taludes simples ou camadas horizontais homogêneas, a modelagem 2D pode ser suficientemente representativa e eficaz (FELL *et al.*, 2014).

No entanto, essa abordagem apresenta limitações importantes. Quando se trata de estruturas com geometria complexa, heterogeneidade de materiais ou interações espaciais acentuadas, como é o caso de muitas barragens, a modelagem 2D pode simplificar excessivamente o sistema, comprometendo a precisão dos resultados. Além disso, a impossibilidade de captar os efeitos tridimensionais pode limitar a compreensão de fenômenos complexos como o fluxo de água e o desenvolvimento de erosão interna (*piping*), que muitas vezes se manifestam de forma não uniforme ao longo da largura ou da profundidade da estrutura (SEQUENT, 2023).

2.4.2. Modelagem 3D

A modelagem tridimensional (3D) representa um avanço significativo nas análises geotécnicas, oferecendo uma visão mais detalhada e realista do comportamento de sistemas complexos. Ao considerar simultaneamente as três dimensões espaciais (comprimento, largura e profundidade), essa abordagem permite simular, com maior precisão, as interações entre o solo, a água e as estruturas. Essa capacidade é particularmente importante em casos como o do *piping* em barragens, onde os mecanismos de falha podem ocorrer de forma localizada e assimétrica ao longo do corpo da estrutura (SEQUENT, 2023; ZANON, 2020).

Dentre as principais vantagens da modelagem 3D, destaca-se a possibilidade de representar com maior consistência as características hidrogeológicas e geotécnicas do sistema, capturando variações que ocorrem tanto vertical quanto lateralmente. Isso reflete em simulações mais realistas do fluxo de água, transporte de partículas e desenvolvimento da erosão interna. Adicionalmente, essa abordagem favorece uma análise de risco mais precisa, ao permitir a identificação de zonas críticas de instabilidade que podem passar despercebidas em modelagens simplificadas em duas dimensões (FELL *et al.*, 2014; TORRES, 2022).

Apesar de suas vantagens, a modelagem 3D apresenta desafios consideráveis. O elevado custo computacional é um dos principais obstáculos, uma vez que esse tipo de análise demanda maior capacidade de processamento e tempo de simulação. Além disso, sua implementação é mais complexa, exigindo do engenheiro um domínio aprofundado sobre a definição das propriedades dos materiais, geometria da estrutura e condições de contorno. Outro fator limitante é a necessidade de um volume mais significativo de dados de entrada, como mapeamentos geológicos detalhados e parâmetros hidráulicos e geotécnicos tridimensionais, cuja obtenção pode ser onerosa e logisticamente difícil, especialmente em áreas remotas (SEEQUENT, 2023; TORRES, 2022).

2.4.3. Avaliação da aplicabilidade de modelagens 2D e 3D

A escolha entre modelagem bidimensional (2D) e tridimensional (3D) está diretamente relacionada à complexidade do problema geotécnico, aos objetivos do projeto e às condições disponíveis para análise. Em estruturas como barragens, especialmente em estudos voltados à investigação de mecanismos de erosão interna como o *piping*, a modelagem 3D tende a oferecer resultados mais representativos da realidade, por permitir a simulação precisa da movimentação da água através do maciço e de suas interações com os materiais constituintes (SEEQUENT, 2023; ZANON, 2020).

Estudos desenvolvidos com base na ferramenta GeoStudio evidenciam que a modelagem 3D tem maior capacidade de captar variações espaciais no fluxo de água e na poropressão, fatores críticos para a identificação de zonas de instabilidade (SEEQUENT, 2023). Em contrapartida, a modelagem 2D pode apresentar limitações na representação desses efeitos, principalmente em geometrias irregulares ou em solos com heterogeneidade significativa ao longo da largura e profundidade da estrutura (FELL *et al.*, 2014).

Ainda assim, a modelagem 2D é bastante útil em estudos preliminares ou em análises de menor escala, nos quais o tempo de simulação, a simplicidade do modelo e a limitação de dados disponíveis se tornam fatores determinantes. Por sua agilidade e menor custo computacional, pode ser aplicada para uma primeira avaliação de estabilidade ou para análises simplificadas de fluxo (SEEQUENT, 2023; FELL *et al.*, 2014).

Em síntese, tanto a modelagem 2D quanto a 3D possuem seu espaço na engenharia geotécnica. A primeira é mais indicada para simulações rápidas e de menor complexidade, enquanto a segunda se destaca pela maior precisão na representação de fenômenos tridimensionais complexos, sendo particularmente recomendada para o estudo de barragens

sujeitas a condições críticas de operação, como aquelas com risco potencial de *piping*. A decisão entre essas abordagens deve ser tomada com base em critérios técnicos e operacionais bem definidos, considerando-se sempre a segurança e a confiabilidade das estruturas analisadas (TORRES, 2022; SEQUENT, 2023).

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizada a modelagem numérica como ferramenta principal de análise, por meio do *software* GeoStudio, versão 2024.2.1, a mais recente disponível. Dentre seus módulos, destaca-se o SEEP/W 2D e 3D, empregado na análise de fluxo de água em meios porosos. A escolha desses módulos se justifica por sua capacidade de simular a percolação em solos, permitindo uma avaliação detalhada do comportamento do fluxo subterrâneo e suas implicações na estabilidade da barragem. Além disso, o SEEP/W possibilita a análise da distribuição de poropressão, posição da linha freática e gradiente hidráulico, aspectos fundamentais na investigação dos mecanismos envolvidos no processo de erosão interna (*piping*) em barragens (SEEQUENT; FELL *et al.*, 2003).

Os dados utilizados na modelagem numérica foram fornecidos pela empresa GeoFast, responsável pelas informações empregadas neste estudo. O conjunto de dados inclui a seção transversal da barragem analisada, as propriedades dos materiais constituintes e as condições de contorno adotadas para a simulação. Ressalta-se que tais informações foram disponibilizadas mediante autorização da empresa e utilizadas exclusivamente para fins acadêmicos, garantindo que a modelagem numérica represente adequadamente as condições reais da estrutura.

Dessa forma, com a definição do *software* e a obtenção dos dados necessários, foi possível estruturar a modelagem numérica de maneira criteriosa, assegurando a fidelidade das simulações às condições reais da barragem. A sequência metodológica adotada neste trabalho corresponde àquela apresentada no curso “Estabilidade e Percolação em Barragens” (RIBEIRO, 2024). Tal abordagem foi aplicada conforme desenvolvida pela equipe técnica da GeoFast durante a execução do curso, fundamentando-se nas boas práticas de simulação numérica e nos conceitos consolidados da engenharia geotécnica. A seguir, apresenta-se o passo a passo adotado no desenvolvimento deste estudo, detalhando as etapas metodológicas utilizadas na análise do fenômeno de *piping*.

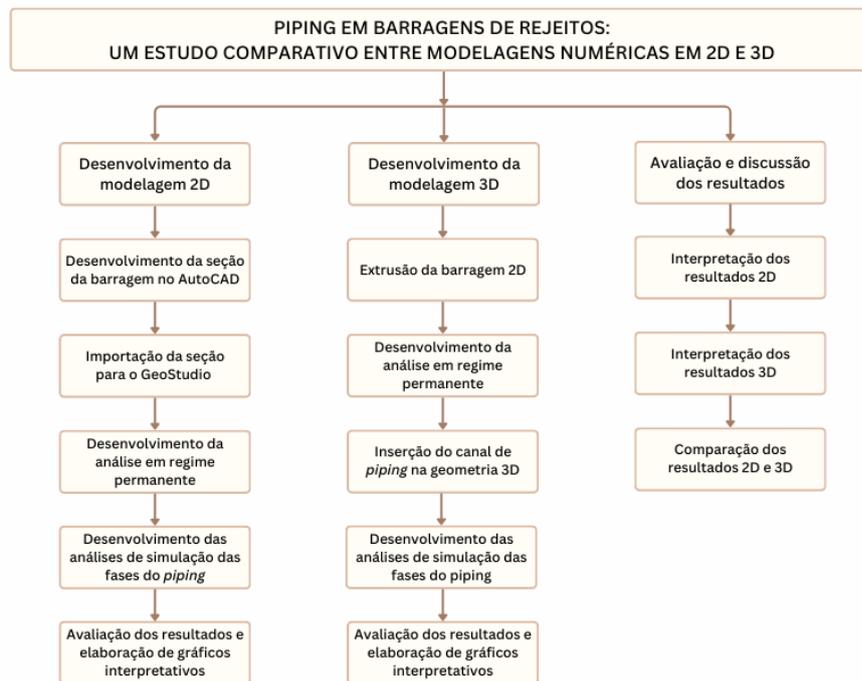
3.1. FLUXOGRAMA

A estruturação da modelagem foi organizada a partir de um fluxograma, que apresenta de forma sequencial as etapas adotadas: desde a obtenção dos dados até a análise final dos

resultados. Esse recurso contribui para uma compreensão mais clara do método aplicado e da lógica empregada no desenvolvimento da pesquisa.

A Figura 12, apresentada a seguir, sistematiza esse processo, permitindo visualizar de forma integrada as fases da modelagem numérica em suas abordagens bidimensional e tridimensional.

Figura 12 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento das modelagens 2D e 3D.



Fonte: Elaboração própria.

3.2. MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica é amplamente empregada na engenharia geotécnica como ferramenta de análise de fenômenos complexos, como a percolação em barragens e a erosão interna. A complexidade geométrica dessas estruturas, aliada à variabilidade nas condições de contorno e nas propriedades dos materiais, torna inviável o uso de soluções analíticas exatas, o que reforça a importância dos métodos numéricos como ferramenta de apoio à engenharia (SILVA, 2016).

Com o avanço das ferramentas computacionais, tornou-se possível implementar técnicas iterativas baseadas em formulações matemáticas que descrevem o comportamento do

fluxo e sua interação com a permeabilidade do meio poroso. Assim, a modelagem numérica permite simular e prever, parâmetros hidráulicos e mecânicos, como o gradiente hidráulico, fornecendo subsídios importantes para a compreensão dos mecanismos associados à erosão interna e ao desenvolvimento do *piping* (SEEQUENT, 2023; FELL *et al.*, 2014).

A representação do fluxo de percolação é um dos pontos centrais dessas análises, uma vez que o movimento da água no interior do maciço é o fenômeno responsável por gerar os gradientes hidráulicos que condicionam a evolução da poropressão e a possível instabilidade por *piping*. Governado pela equação de Darcy, esse fluxo é diretamente influenciado pela condutividade hidráulica do solo e pelas condições de contorno impostas ao modelo (SEEQUENT, 2023; FELL *et al.*, 2014). Por isso, a avaliação precisa da trajetória da água e da distribuição de poropressão ao longo do maciço permite identificar zonas críticas e traçar cenários potenciais de falha. Com base nessa abordagem, os resultados obtidos nas modelagens 2D e 3D poderão ser discutidos de forma comparativa, buscando compreender a eficácia e as limitações de cada representação frente aos mecanismos de erosão interna.

No presente trabalho, foi utilizado o *software* GeoStudio, por meio dos módulos SEEP/W 2D e 3D, para a simulação do fluxo subterrâneo em estruturas sujeitas à percolação. O objetivo da modelagem é desenvolver análises bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) de forma a verificar, por meio da aplicação prática, as possibilidades de avaliação que cada abordagem oferece diante de um mesmo cenário. A partir dessas análises, busca-se identificar as diferenças e limitações entre as duas formas de modelagem, com base em critérios observados nos resultados e nas práticas consolidadas da literatura especializada (SEEQUENT, 2023; FELL *et al.*, 2014).

3.2.1. Módulo SEEP/W

A análise da percolação em barragens e a avaliação de riscos associados a processos como a erosão interna requerem ferramentas computacionais capazes de representar, com precisão, o comportamento do fluxo de água em meios porosos. Dada a complexidade geométrica dessas estruturas e as variações nas condições de contorno, torna-se inviável a aplicação de soluções analíticas exatas na maioria dos casos práticos, o que reforça a necessidade do uso de métodos numéricos. Entre esses métodos, o Método dos Elementos Finitos (MEF) destaca-se como uma das abordagens mais consolidadas na engenharia geotécnica, por permitir a discretização do meio contínuo em subdomínios interligados,

viabilizando a obtenção de soluções aproximadas adequadas à realidade do problema (STRUFALDI, 2004).

Neste trabalho, a modelagem numérica foi realizada por meio do *software* GeoStudio, utilizando-se os módulos SEEP/W 2D para análises bidimensionais e o módulo SEEP/W 3D para análises tridimensionais. O SEEP/W é um programa baseado no Método de Elementos Finitos (MEF), desenvolvido pela empresa canadense Geo-Slope International, atual Seequent, voltado à análise de fluxo de água em meios porosos, com capacidade para modelar tanto condições saturadas quanto não saturadas, em regime permanente ou transitório (SEEQUENT, 2023).

A interface do SEEP/W permite ao usuário construir o modelo por meio da definição da geometria, aplicação das propriedades dos materiais e condições de contorno, geração automática da malha de elementos finitos e interpretação visual dos resultados, o que torna o processo de modelagem mais dinâmico e acessível (SEEQUENT, 2023). Complementando essa abordagem, a versão tridimensional do GeoStudio possibilita representar com maior fidelidade estruturas geotécnicas complexas, oferecendo a oportunidade de explorar efeitos tridimensionais que não podem ser captados por modelos bidimensionais.

Neste estudo, as modelagens 2D e 3D serão comparadas com o intuito de verificar as possibilidades de representação oferecidas por cada abordagem e avaliar, de forma exploratória, os aspectos que podem influenciar a identificação de regiões mais suscetíveis a processos de instabilidade, como a erosão interna em barragens (SILVA, 2016).

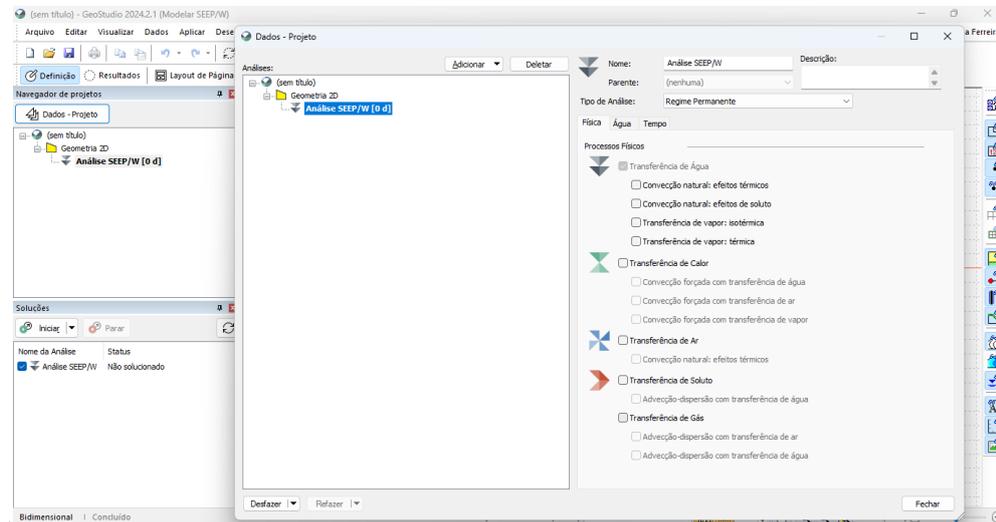
3.2.2. Modelagem Bidimensional (2D)

A modelagem bidimensional da barragem foi realizada utilizando o módulo SEEP/W 2D do *software* GeoStudio, ferramenta reconhecida por sua precisão na simulação de fluxo em meios porosos. O desenvolvimento da simulação seguiu uma sequência de etapas que visaram garantir a representatividade e a fidelidade do modelo às condições reais da barragem estudada:

1. **Criação da análise SEEP/W no GeoStudio:** A modelagem teve início com a criação de um novo projeto no *software* GeoStudio, onde foi selecionado o módulo SEEP/W e definido o tipo de análise como fluxo em regime permanente. Esse tipo de análise permite simular o comportamento do fluxo de água quando as condições permanecem constantes ao longo do tempo, sendo ideal para avaliação da percolação sob condições normais de operação da barragem (SEEQUENT, 2023). A Figura 13 ilustra o ambiente

do *software* no momento da criação da análise, destacando as opções selecionadas para início da simulação.

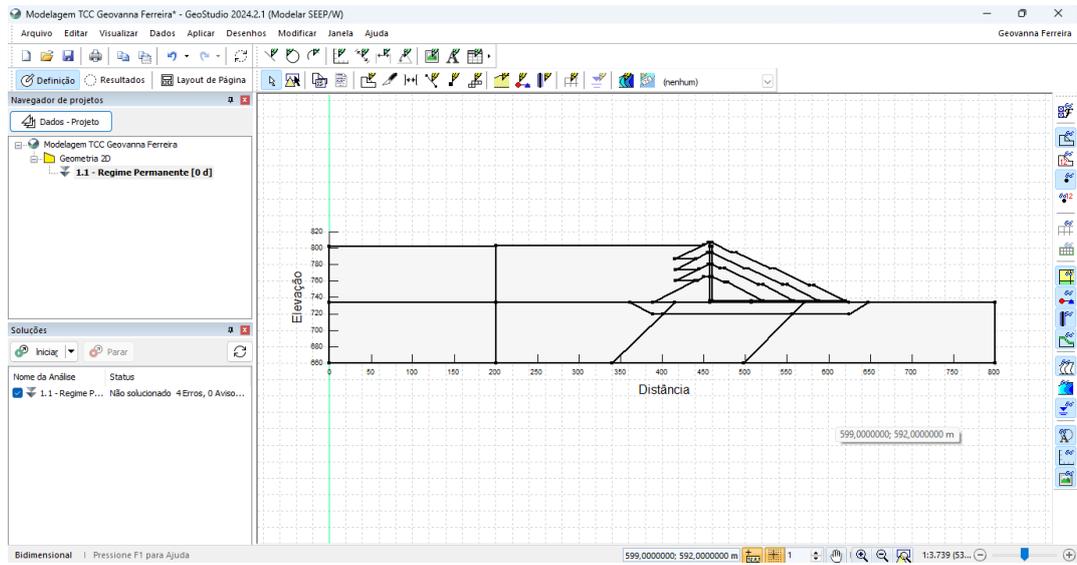
Figura 13 – Ambiente de criação de análises no GeoStudio.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio (SEEQUENT, 2023).

2. **Importação da geometria da barragem:** A geometria utilizada na modelagem corresponde a uma barragem de rejeito, desenvolvida pela equipe técnica da empresa GeoFast com base em critérios reais de projeto. A seção transversal foi elaborada no *software* AutoCAD, respeitando as dimensões e proporções características desse tipo de estrutura. O arquivo foi posteriormente importado para o SEEP/W em formato DXF, garantindo que os elementos estruturais fossem corretamente posicionados no modelo. Essa etapa é essencial para assegurar que o comportamento hidráulico simulado represente de forma fiel a geometria real da barragem, permitindo uma análise mais confiável dos processos de percolação.
3. **Configuração das unidades e eixos de trabalho:** Após a importação da geometria, foi realizada a configuração do ambiente de modelagem, definindo-se as unidades de medida, sistema de coordenadas e escala. Essa etapa garante que todos os parâmetros inseridos sejam coerentes com as dimensões reais da estrutura e que os resultados obtidos possam ser interpretados corretamente. A Figura 14 apresenta a interface do *software* durante essa configuração, evidenciando os ajustes realizados na geometria, unidades e eixos.

Figura 14 – Configuração da geometria, unidades e eixos no GeoStudio.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

4. **Inserção das propriedades dos materiais:** Cada região da barragem foi associada a um tipo de material com características específicas. Os materiais utilizados na modelagem foram definidos com base em dados fornecidos pela empresa GeoFast, sendo adotados conforme suas respectivas propriedades hidráulicas para simulação no módulo SEEP/W. A Tabela 1 apresenta os materiais e parâmetros empregados neste estudo.

Tabela 1- Propriedades hidráulicas dos materiais utilizados na modelagem numérica.

Material	Modelo	k (m/s)	ky'/kx'	θ_{sat}	θ_r	Tipo
Aterro	Sat/N. Sat	4e-07	0,25	0,4	0,06	Silte
Rejeito	Sat/N. Sat	1e-06	0,3	0,44	0,05	Areia Siltosa
Filtro	Sat/N. Sat	0,0001	1	0,35	0,04	Areia
F1	Sat	1e-07	1	0,4	-	-
F2	Sat	1e-06	1	0,45	-	-

Nota: Sat/N. Sat: Saturado/Não Saturado; Sat: Saturado; k: condutividade hidráulica, ky'/kx' : razão entre condutividade hidráulica vertical (k_v) e horizontal (k_x); θ_{sat} = teor de umidade volumétrico saturado; θ_r = teor de umidade volumétrico residual.

Fonte: Dados fornecidos pela empresa GeoFast (2024).

No *software* SEEP/W, a definição dos materiais pode seguir dois modelos principais: saturado ou saturado/não saturado. No modelo saturado, assume-se que o

solo está completamente preenchido por água, não havendo presença de ar nos poros, o que simplifica os cálculos relacionados à movimentação do fluxo. Nesse caso, é necessário inserir diretamente o valor da condutividade hidráulica saturada do material, assim como o teor de umidade volumétrica saturada, conforme exigido na interface do programa. Tais parâmetros são essenciais para descrever o comportamento do fluxo de água em regime permanente, onde não se considera variação significativa no conteúdo de umidade ao longo do tempo ou da profundidade. Essa abordagem é adequada quando se deseja avaliar o estado estacionário do fluxo em barragens, especialmente para análises iniciais ou situações onde se assume equilíbrio hidráulico (SEEQUENT, 2023).

Já o modelo saturado/não saturado considera que o solo pode conter tanto água quanto ar nos seus vazios, e que a permeabilidade varia conforme a umidade. Nesse caso, os materiais são definidos a partir de funções características, especialmente:

- Função de teor de umidade volumétrica (θ): relaciona a sucção do solo — isto é, a pressão negativa exercida pela água nos poros em condições não saturadas — com o conteúdo de água armazenado nos vazios. Essa função é fundamental para compreender o comportamento hidráulico do solo em diferentes níveis de saturação, pois define como a umidade varia conforme a energia com que a água está retida no solo (SEEQUENT, 2023; VAN GENUCHTEN, 1980).
- Função de condutividade hidráulica (k): descreve como a capacidade do solo de conduzir água varia de acordo com seu teor de umidade. Em solos secos, a condutividade hidráulica é extremamente baixa, aumentando progressivamente à medida que o solo se aproxima da saturação. Essa função é essencial para simular o fluxo em meios porosos não saturados, como ocorre em diversos pontos de barragens de terra ou de rejeitos (VAN GENUCHTEN, 1980; FREITAS; PEREIRA, 2018).

Essas funções permitem ao SEEP/W modelar o fluxo em condições mais realistas, especialmente em barragens de terra sujeitas a variações sazonais, infiltrações ou fluxos não uniformes, como ocorre em processos associados à erosão interna (CARDOSO, 2023; SEEQUENT, 2023).

A escolha entre os modelos depende do tipo de análise. Neste estudo, optou-se por representar materiais com ambos os modelos, de forma a garantir maior

compatibilidade com os dados fornecidos e atender às exigências de cada cenário simulado.

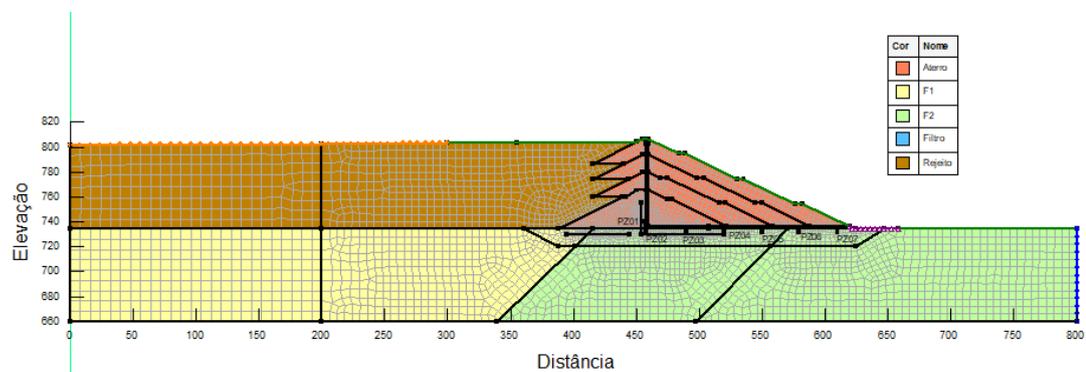
5. **Definição das condições de contorno hidráulico:** Foram aplicadas condições de contorno hidráulico na face montante da barragem, simulando o nível de água do reservatório, enquanto na face jusante foram definidas condições de saída de fluxo, especialmente nas regiões correspondentes ao sistema de drenagem. Também foi incluída a condição denominada *Drainage*, simulando um ponto adicional de escoamento natural da água na base da barragem. Essa configuração representa uma saída livre para o fluxo percolado, permitindo sua liberação do interior do maciço e contribuindo para o controle da poropressão e prevenção de surgências (SEEQUENT, 2023). Essas condições são fundamentais para simular o movimento da água através do maciço e identificar potenciais trajetórias de percolação. Além disso, com o auxílio de pontos e linhas, as áreas específicas de aplicação das condições de contorno foram delimitadas diretamente na geometria do modelo. Essa definição criteriosa evita erros de simulação, como a imposição indevida de carga hidráulica sobre regiões impermeáveis ou elementos do sistema de drenagem, garantindo maior coerência entre o modelo numérico e as condições reais da estrutura.
6. **Geração da malha de elementos finitos:** A geometria modelada foi discretizada em uma malha composta por elementos finitos, conforme os recursos disponíveis no módulo SEEP/W 2D. A malha é o componente essencial para a solução numérica do modelo, permitindo que as equações diferenciais que regem o fluxo em meios porosos sejam resolvidas em pequenos subdomínios da barragem.

Foi aplicada uma refinação específica da malha nas regiões consideradas críticas para a análise, como a interface entre o núcleo impermeável e os filtros, e a zona próxima ao dreno, onde há maior variação nos gradientes hidráulicos. Esse refinamento local melhora a precisão dos cálculos nessas áreas, possibilitando uma avaliação mais detalhada da poropressão e da distribuição da carga hidráulica no interior do maciço (SEEQUENT, 2023).

O cuidado na geração da malha contribui diretamente para a qualidade dos resultados numéricos, sendo uma etapa fundamental em estudos que envolvem análise de estabilidade e erosão interna, como no caso do *piping*.

7. **Desenho de linhas e pontos auxiliares para análise:** Foram traçadas linhas auxiliares utilizadas para a interpretação dos resultados gerados pelo SEEP/W 2D. Essas linhas permitem avaliar a variação de parâmetros como carga hidráulica e pressão ao longo de trechos específicos do modelo, contribuindo para uma análise mais precisa das condições internas do maciço (SEEQUENT, 2023). Além disso, foram definidos pontos que simulam a posição dos piezômetros instalados na barragem. A Figura 15, apresentada a seguir, mostra a seção transversal totalmente configurada no SEEP/W, com destaque para as linhas auxiliares e os pontos simulados, que servem como base para a análise dos resultados.

Figura 15 – Seção transversal da barragem configurada no SEEP/W.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

8. **Solução da análise numérica:** Após a inserção dos dados, a verificação da geometria e a checagem das propriedades dos materiais e das condições de contorno, a simulação foi executada por meio da ferramenta “Solve”, disponível na interface do SEEP/W. Essa ferramenta é responsável pela resolução numérica do modelo, utilizando o Método dos Elementos Finitos para processar os cálculos referentes ao fluxo de água em todo o domínio analisado. Ao final do processo, o *software* gera um conjunto de resultados numéricos e possibilita a criação de gráficos que servem de base para a etapa de interpretação dos dados.
9. **Identificação da linha freática:** A linha freática foi determinada com base nos resultados de saturação e poropressão gerados pelo modelo numérico. O SEEP/W permite visualizá-la como uma curva que separa a zona saturada da não saturada dentro do maciço, sendo um dos principais indicativos da eficiência do sistema de drenagem

da barragem (SEEUENT, 2023). Sua representação será apresentada na seção de resultados.

Com as configurações iniciais devidamente concluídas, deu-se início à simulação do *piping* na modelagem bidimensional. Esta etapa teve como objetivo principal representar o comportamento do fluxo subterrâneo sob condições que favorecem o surgimento de erosão interna, a partir da definição de parâmetros hidráulicos, aplicação de condições de contorno específicas e avaliação dos gradientes gerados. A modelagem foi estruturada em fases, a fim de observar com maior clareza o desenvolvimento do processo de percolação e seus efeitos ao longo do tempo.

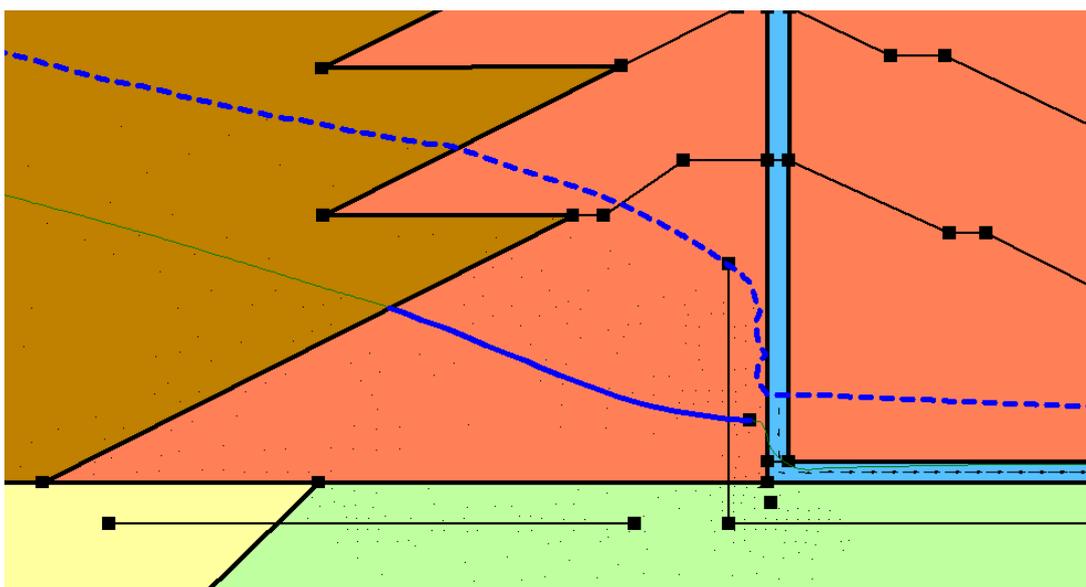
O método de simulação do *piping* por meio de análises de fases no SEEP/W foi adotado como um artifício numérico com o objetivo de representar, de forma progressiva, o avanço da erosão interna no interior do maciço. Essa estratégia, previamente descrita, consiste na criação de diferentes análises encadeadas, nas quais trechos sucessivos de linhas drenantes são inseridos ao longo da estrutura, simulando a propagação do *piping* desde a jusante até a montante. A abordagem permite acompanhar o comportamento do fluxo à medida que o caminho preferencial de percolação se desenvolve, favorecendo uma interpretação mais clara da instabilidade provocada por gradientes elevados de carga hidráulica (SEEUENT, 2023).

A seguir, são apresentadas as fases implementadas na modelagem numérica:

- 10. Fase 1 – Início do *piping*:** A primeira fase da simulação teve como foco a representação do início da formação de caminhos preferenciais de percolação no interior do maciço. Para isso, foi criada uma nova análise derivada da modelagem inicial, nomeada como “*Piping* Fase 1”. O tempo de simulação foi definido como um dia em regime permanente, seguindo a lógica adotada para as demais fases, de forma a permitir a observação do comportamento hidráulico ao final de cada estágio de avanço da erosão interna, sem considerar variações temporais intermediárias (SEEUENT, 2023). O trajeto de fluxo foi iniciado a partir do ponto correspondente ao piezômetro mais próximo da jusante, simulando uma situação em que os primeiros sinais de alteração no perfil piezométrico indicam a possível formação de um caminho preferencial de escoamento. Com base nesse raciocínio, traçou-se uma linha de fluxo utilizando a

ferramenta de polilinha do SEEP/W, representando graficamente o início da trajetória da erosão. Essa linha foi previamente subdividida em segmentos, com o objetivo de facilitar a ativação progressiva dos trechos nas fases subsequentes da simulação. Somente após essa marcação, a linha foi convertida em elementos de interface, e o primeiro segmento recebeu o material “filtro”, simulando um trecho inicial de canalização do fluxo gerado pela erosão interna. A escolha desse material se justifica por suas propriedades de elevada permeabilidade e baixa retenção de umidade, características que o tornam adequado para representar artificialmente a formação de vazios internos e trajetórias preferenciais de percolação no contexto de *piping* (SEEQUENT, 2023). A Figura 16, apresentada a seguir, ilustra a linha de fluxo traçada no SEEP/W 2D para representar o início do *piping*, evidenciando o trajeto inicial simulado e a definição dos segmentos utilizados na progressão das fases.

Figura 16 – Representação da linha de fluxo traçada no SEEP/W para simulação do *piping*.

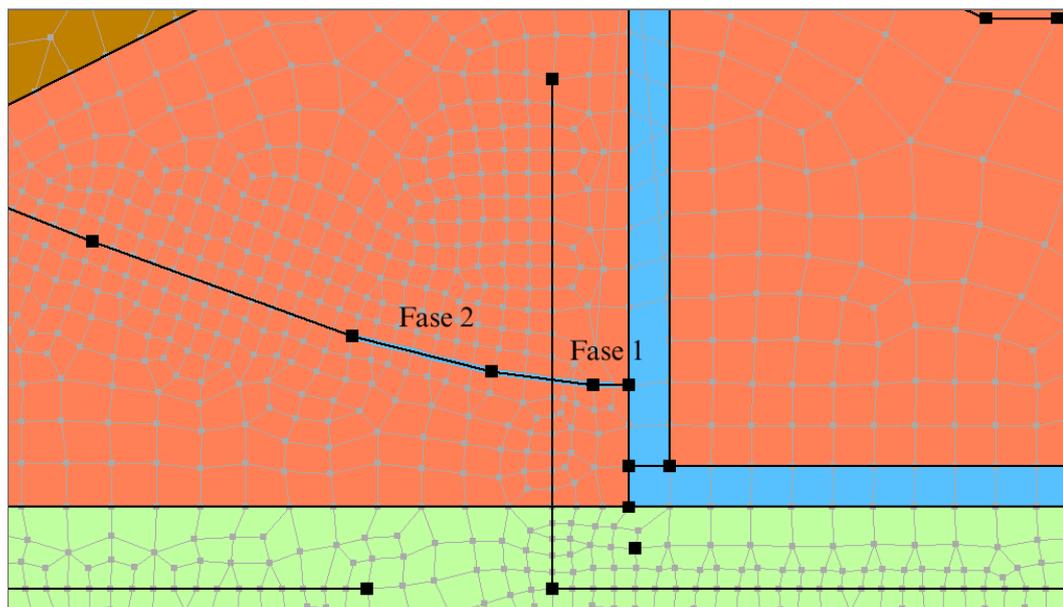


Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

- 11. Fase 2 – Avanço da Erosão:** Na segunda fase da simulação, o caminho de *piping* foi estendido em direção ao interior do corpo da barragem, representando a progressão da erosão interna. Para isso, foi criada uma nova análise a partir da Fase 1, mantendo-se todas as configurações anteriores, como condições de contorno, malha e definição dos materiais. Nessa etapa, não houve alteração geométrica ou adição de novos elementos. O segundo trecho da linha de fluxo, já desenhado e segmentado na etapa anterior, foi

ativado por meio da aplicação do material “filtro” diretamente sobre o novo segmento. Essa ação simulou a continuidade da erosão ao longo do maciço, permitindo observar os efeitos da ampliação do caminho de percolação sobre os campos de poropressão e a linha freática. A Figura 17, a seguir, apresenta a visualização das Fases 1 e 2 no SEEP/W, destacando os segmentos ativados com o material filtro e evidenciando a progressão simulada do *piping* no interior do maciço.

Figura 17 – Aplicação do material filtro nas Fases 1 e 2 da trajetória simulada de *piping*.

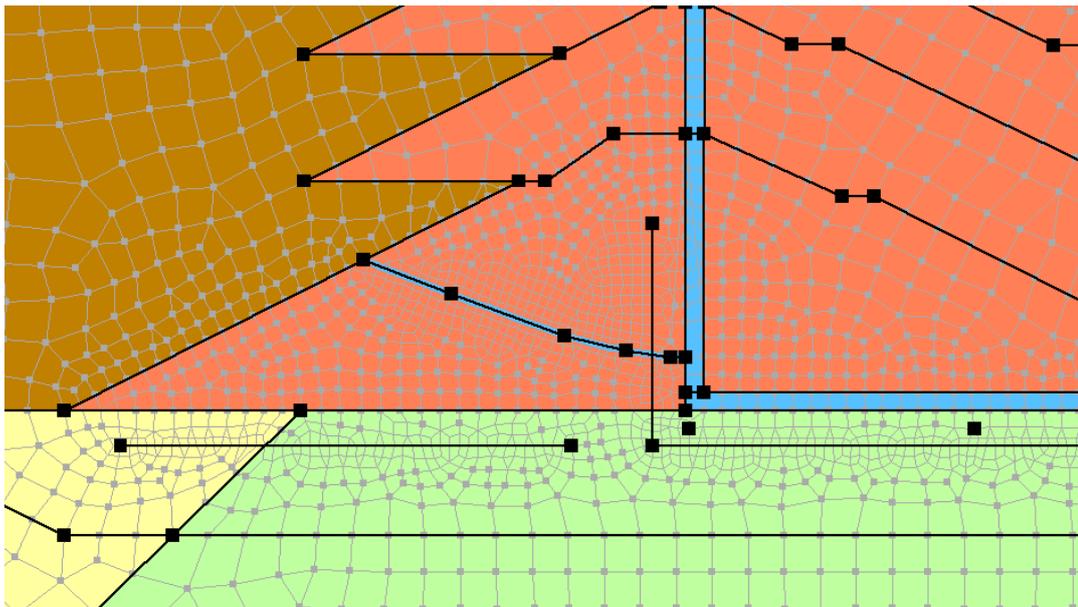


Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

12. **Fase 3 – Proximidade da Montante:** A terceira fase representou a continuidade do avanço da erosão, simulando sua aproximação da face montante da barragem. Seguindo a mesma metodologia adotada nas fases anteriores, foi criada uma nova análise a partir da Fase 2, preservando todas as configurações já definidas. Com os segmentos da linha de fluxo previamente traçados, a única modificação realizada nesta etapa consistiu na aplicação do material “filtro” no terceiro trecho da linha. Essa ação representou o avanço final da trajetória do *piping* até a região próxima ao reservatório, permitindo avaliar os efeitos hidráulicos associados à propagação da erosão interna até uma zona crítica da estrutura.
13. ***Piping* Estabelecido:** A fase final da modelagem simulou a condição de *piping* estabelecido, em que todo o trajeto preferencial de percolação já se encontra formado, conectando diretamente a face montante à jusante da barragem. A nova análise foi criada

a partir da Fase 3, e a única modificação realizada consistiu na aplicação do material “filtro” no trecho final da linha de fluxo, completando a trajetória definida nas fases anteriores. Esse cenário permitiu a avaliação do comportamento hidráulico da barragem em uma condição crítica de condução concentrada de fluxo, possibilitando a análise da distribuição de poropressão, do traçado da linha freática e dos gradientes hidráulicos resultantes. A simulação é fundamental para compreender os efeitos da erosão interna sob sua forma mais avançada, auxiliando na identificação de pontos vulneráveis da estrutura e na definição de medidas preventivas e corretivas. A Figura 18 apresenta o modelo 2D com o *piping* totalmente estabelecido, evidenciando a trajetória completa da percolação simulada entre montante e jusante, e permitindo uma leitura detalhada das alterações nos parâmetros hidráulicos ao longo da estrutura.

Figura 18 – Representação do *piping* estabelecido na modelagem 2D.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

14. **Interpretação dos resultados:** Após a completa configuração do modelo bidimensional procedeu-se à execução das análises para cada uma das fases do *piping*. A funcionalidade de processamento em lote do SEEP/W 2D foi utilizada para rodar as simulações de forma sequencial e automatizada. Essa ferramenta garantiu a continuidade entre as etapas, otimizando o tempo de processamento e assegurando coerência entre os modelos. Durante a execução, o *software* solucionou as equações de fluxo baseadas nas condições de contorno e propriedades previamente definidas. Ao

final, os resultados foram extraídos, especialmente nos pontos de monitoramento correspondentes aos piezômetros simulados. Esses dados subsidiarão a análise detalhada da evolução do *piping*, apresentada no próximo capítulo.

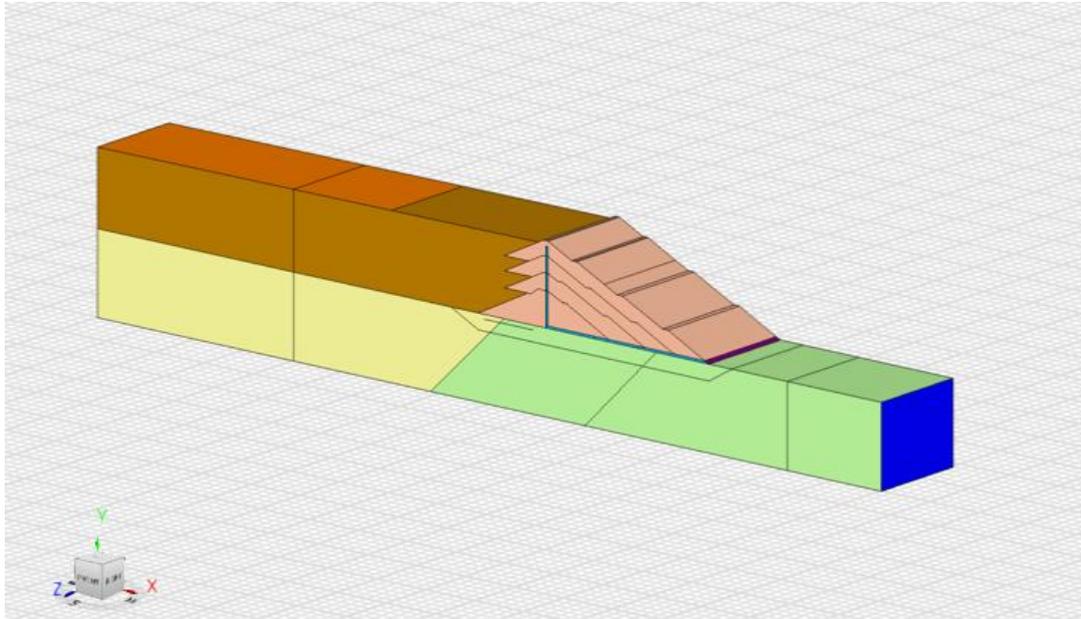
3.2.3. Modelagem tridimensional (3D)

A modelagem tridimensional da barragem foi desenvolvida com o objetivo de representar com maior consistência o comportamento do fluxo de água no interior da estrutura, considerando a variação espacial ao longo dos três eixos. Para isso, utilizou-se o SEEP/W 3D do GeoStudio, que permite a criação de modelos volumétricos por meio da extrusão da geometria bidimensional, integrando os dados já definidos na análise 2D. A seguir, descrevem-se as etapas seguidas na construção e análise do modelo 3D:

1. **Criação do ambiente de modelagem 3D no GeoStudio:** Para dar início à modelagem tridimensional, foi adicionada uma nova geometria 3D no mesmo projeto utilizado para a análise 2D. O GeoStudio permite trabalhar com múltiplas geometrias no mesmo ambiente, facilitando a organização e o reaproveitamento de dados. A partir da criação da Geometria 3D, foi iniciada uma nova análise de fluxo utilizando o módulo SEEP/W 3D, com tipo de análise definido como Regime Permanente, tal como na modelagem bidimensional. Em seguida, acessou-se o BUILD3D — ferramenta específica do GeoStudio responsável pela construção da geometria 3D. Dentro do BUILD3D, foi utilizada a função de importação de análise, selecionando-se a análise 2D previamente desenvolvida. Essa escolha foi adotada com o intuito de explorar os melhores recursos disponíveis no *software*, garantindo agilidade, continuidade e fidelidade entre as diferentes etapas de modelagem (SEEQUENT, 2023).
2. **Extrusão da geometria 2D:** A geometria previamente construída no SEEP/W foi extrudada utilizando a ferramenta *Extrude Geometry*, com uma profundidade de 100 metros, correspondente à largura representativa da barragem em planta. Essa extrusão transformou o modelo 2D em um sólido tridimensional, mantendo todas as definições originais de materiais, interfaces e elementos estruturais. A escolha da largura de 100 metros baseou-se em uma estimativa realista da extensão transversal da barragem, garantindo uma representação volumétrica compatível com as dimensões típicas desse tipo de estrutura e adequada para os objetivos da simulação (SEEQUENT, 2023). A Figura 19 apresenta o resultado da extrusão da geometria 2D para o ambiente

tridimensional, permitindo a visualização da estrutura completa utilizada na modelagem 3D.

Figura 19 - Geometria extrudada a partir do modelo bidimensional para composição do modelo 3D.

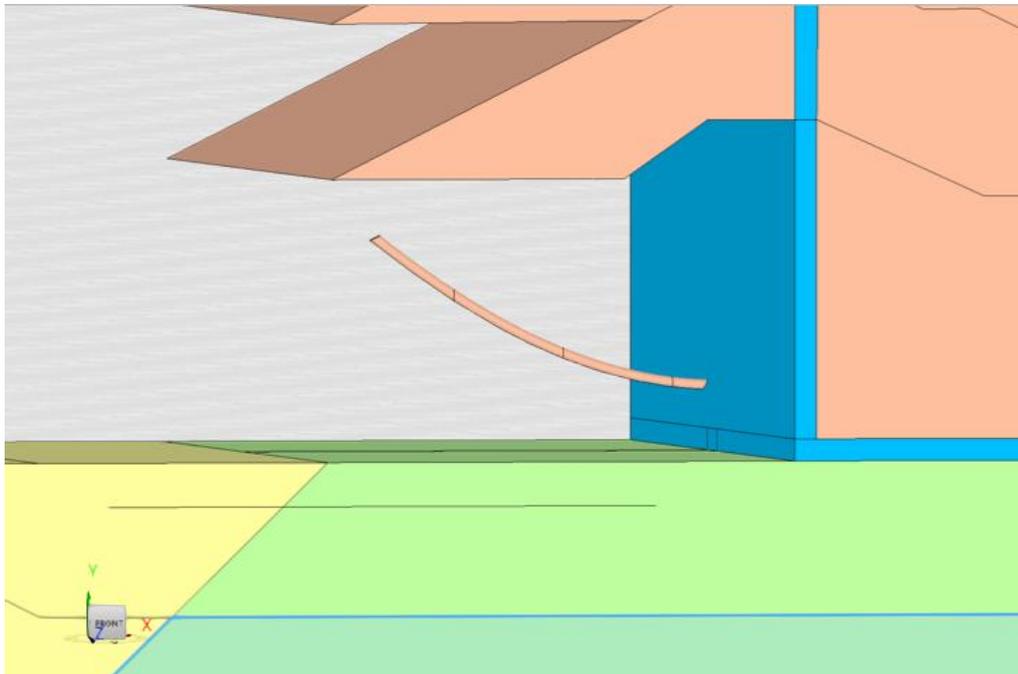


Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

3. **Verificação da transferência dos parâmetros:** O *software* realiza automaticamente a transferência das propriedades hidráulicas dos materiais e das condições de contorno aplicadas no modelo 2D. Ainda assim, foi conduzida uma verificação detalhada para garantir que todos os dados fossem corretamente importados para o ambiente tridimensional. Essa checagem incluiu os parâmetros de condutividade hidráulica, relações de anisotropia e limites hidráulicos definidos anteriormente, assegurando a fidelidade entre as análises 2D e 3D (SEEQUENT, 2023).
4. **Criação do canal simulando o *piping*:** Devido à complexidade do modelo tridimensional, em que a geometria é automaticamente subdividida em diversos sólidos, a aplicação direta do material “filtro” na mesma superfície utilizada na modelagem 2D exigiria um processo manual extremamente trabalhoso. Por essa razão, optou-se por uma abordagem alternativa: a criação de um canal interno, representando o trajeto da erosão interna no interior do maciço, conforme ilustrado na figura 20. Esse canal foi desenvolvido com 1 metro de diâmetro, valor comumente adotado em estudos técnicos como referência prática para a representação de trajetos erosivos com vazios significativos. A adoção dessa dimensão permitiu representar um caminho de fluxo

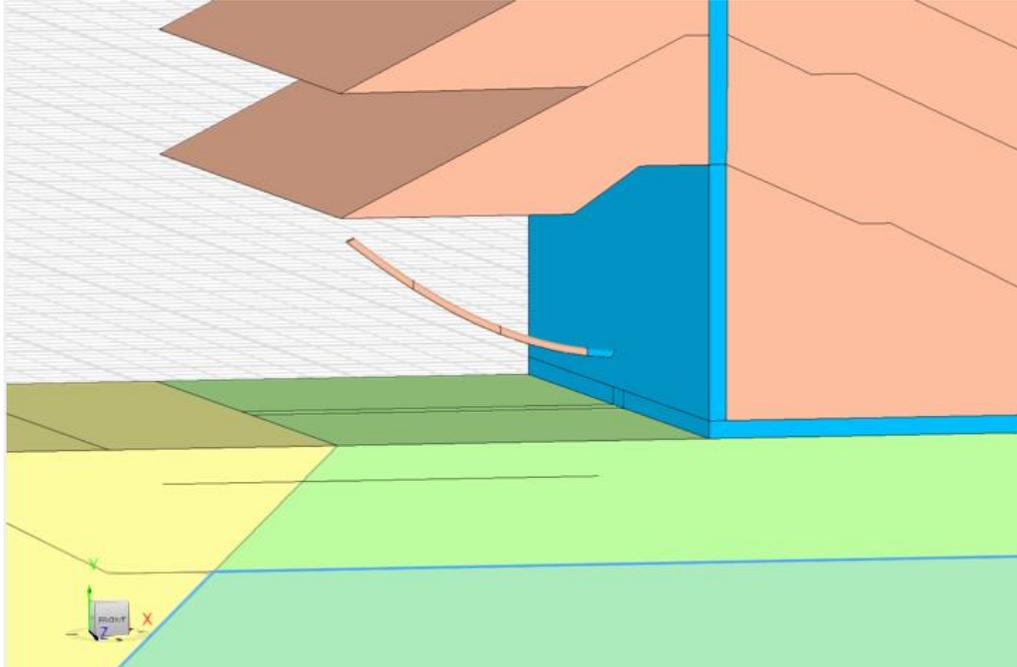
concentrado de forma simplificada e compatível com a escala da estrutura, além de preservar a estabilidade da simulação numérica (SEEQUENT, 2023). A construção do canal foi realizada no ambiente 3D do GeoStudio, ao longo do trajeto previamente marcado como linha de fluxo, de forma a manter a coerência com o modelo bidimensional. Para representar a evolução progressiva do *piping*, o canal foi segmentado em três partes, correspondentes às fases simuladas na modelagem 2D. Assim como feito anteriormente, foram criadas análises separadas para cada fase, nas quais o material “filtro” foi inserido de maneira sequencial, conforme o avanço simulado da erosão interna. A Figura 21 ilustra a simulação da Fase 1, com o primeiro segmento ativado. A Figura 22 apresenta a Fase 2, na qual o segundo trecho do canal foi adicionado à simulação. A Figura 23 mostra a Fase 3, com a expansão do caminho erosivo até o limite da jusante. Por fim, a Figura 24 representa o *piping* totalmente estabelecido, com todos os trechos ativados, simulando uma condição crítica de percolação contínua.

Figura 20 – Geometria do canal de *piping* desenvolvido no modelo 3D.



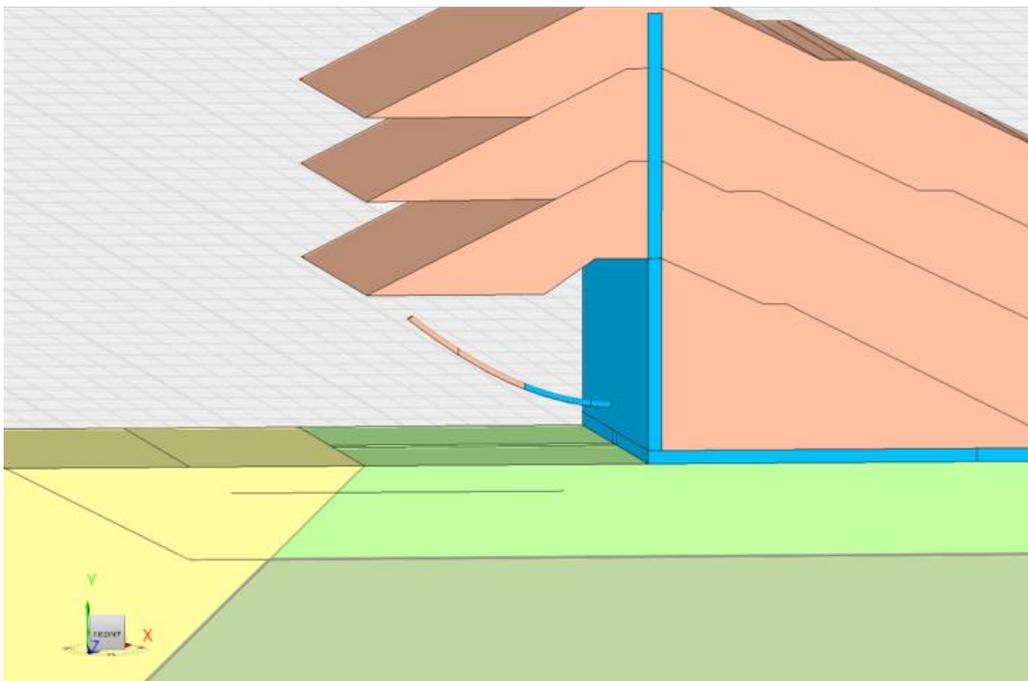
Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

Figura 21 – Representação da Fase 1 do *piping* no modelo 3D.



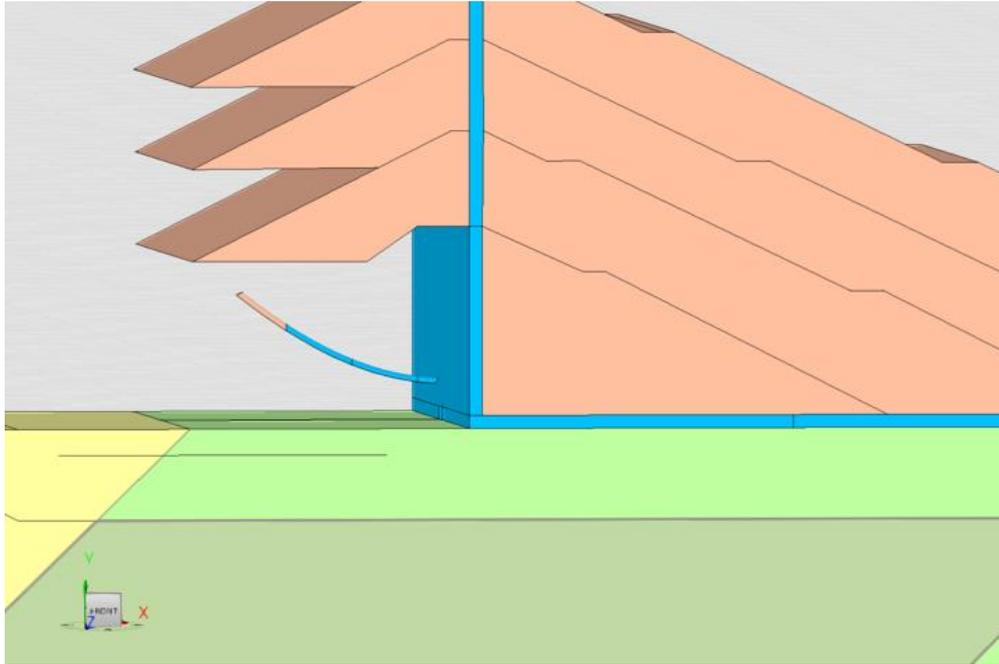
Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

Figura 22 – Representação da Fase 2 do *piping* no modelo 3D.



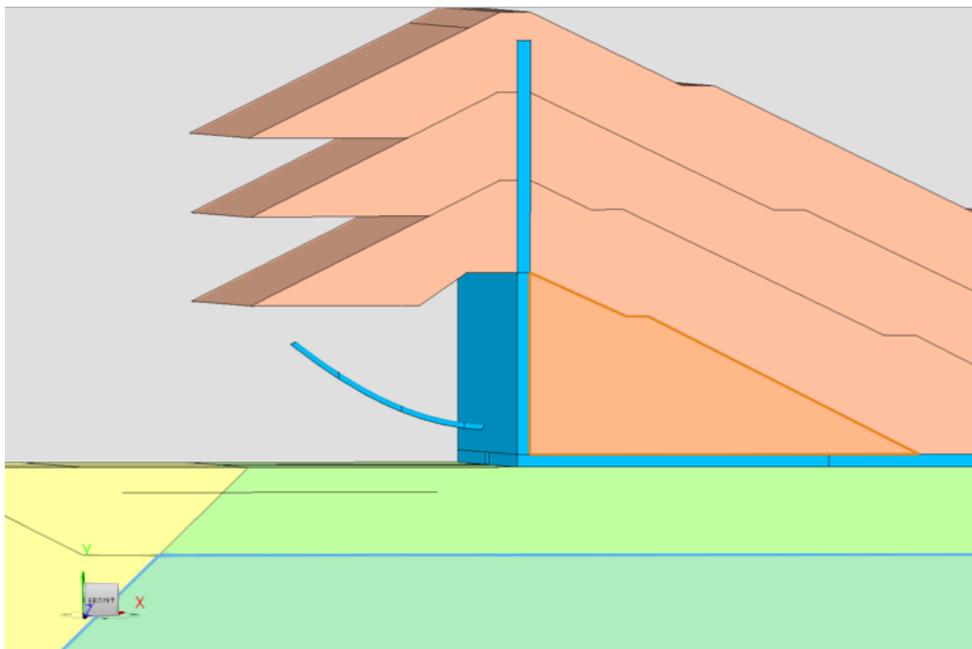
Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

Figura 23 – Representação da Fase 3 do *piping* no modelo 3D.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

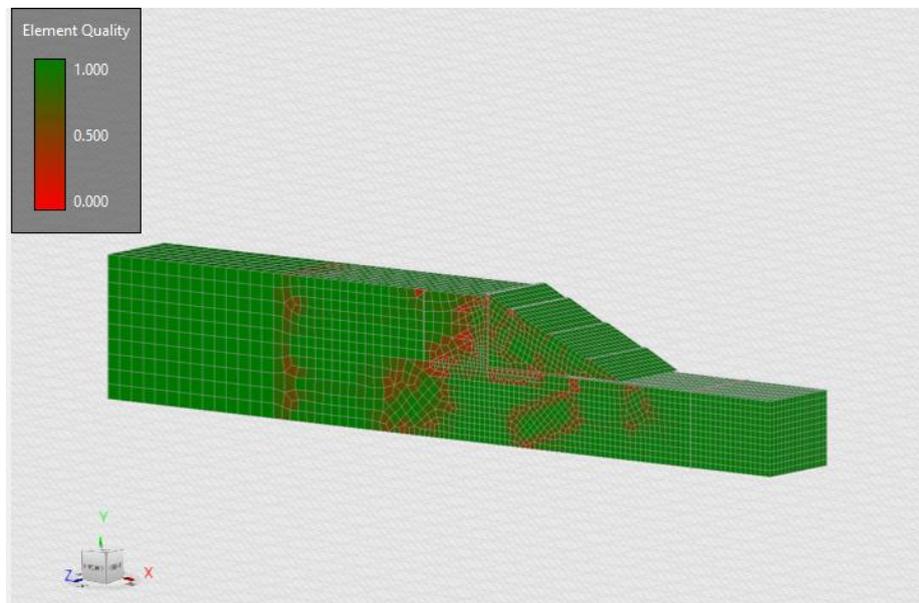
Figura 24 – Representação do *piping* estabelecido no modelo 3D.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

5. **Geração e refinamento da malha:** Para a discretização do modelo tridimensional, foi utilizada uma malha composta por elementos hexaédricos. A escolha desse tipo de elemento se baseou em estudos realizados pela equipe técnica da GeoFast, os quais demonstraram que malhas hexaédricas apresentaram melhor desempenho e maior estabilidade numérica em comparação aos elementos tetraédricos, especialmente em simulações de fluxo em meios porosos. A malha foi gerada automaticamente pelo *software*, com o comprimento de 6 metros, valor definido como adequado à escala do modelo e à complexidade das análises. Assim como adotado na modelagem 2D, foi aplicado um refinamento adicional nas regiões de maior interesse. Nesses locais, foram utilizados elementos menores, visando maior precisão nos resultados, especialmente na avaliação dos gradientes hidráulicos e da poropressão. O refinamento localizado também contribuiu para a redução de erros numéricos e garantiu maior consistência à representação do comportamento hidráulico no interior do maciço (SEEQUENT, 2023). A Figura 25, apresentada a seguir, mostra o resultado da geração da malha tridimensional, destacando a verificação da qualidade dos elementos e o refinamento aplicado nas regiões de interesse.

Figura 25 – Verificação da qualidade dos elementos da malha no modelo tridimensional.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio.

A análise de qualidade da malha evidencia que a maior parte dos elementos apresenta geometria satisfatória, com predomínio da coloração verde. As regiões marcadas em vermelho indicam elementos de baixa qualidade, geralmente associados a geometrias complexas ou zonas de transição entre materiais, como interfaces curvas ou pontos de encontro entre sólidos. Embora essas áreas mereçam atenção, não comprometeram a estabilidade do modelo, sendo consideradas aceitáveis dentro dos critérios do *software* (SEEQVENT, 2023).

6. **Definição dos pontos de monitoramento (piezômetros):** Para monitorar e analisar os resultados da simulação nos mesmos locais dos piezômetros instalados na barragem 2D, foram definidos pontos específicos no modelo tridimensional utilizando a ferramenta "Location" do SEEP/W 3D. Este procedimento replicou a abordagem adotada na modelagem 2D, garantindo consistência na comparação entre as duas análises. A ferramenta "Location" permite a criação de pontos de interesse dentro do domínio modelado, facilitando a extração de resultados em coordenadas específicas. Cada ponto foi posicionado de acordo com as coordenadas reais dos piezômetros no campo, assegurando que as leituras extraídas do modelo numérico correspondam aos dados de campo. Este processo foi repetido para todos os piezômetros, estabelecendo uma rede de pontos de monitoramento que auxiliará na geração de gráficos e na interpretação dos resultados durante a fase de análise.
7. **Execução da simulação tridimensional:** Com todas as definições ajustadas, a simulação foi executada no ambiente 3D do GeoStudio. O processamento da análise leva mais tempo que a 2D, em função da maior complexidade geométrica e do volume de dados envolvidos.

3.3. CRITÉRIOS DE ANÁLISE

A análise dos resultados da modelagem numérica bidimensional teve como base alguns parâmetros principais, sendo eles:

1. **Linha Freática:** A posição da linha freática é crucial na análise de barragens de terra. Uma linha freática elevada pode indicar maior saturação do maciço, aumentando as poropressões e

reduzindo a estabilidade do talude de jusante. Monitorar sua posição permite identificar zonas potencialmente saturadas e avaliar o risco de erosão interna (LIMA, 2019).

2. Sensibilidade dos Instrumentos: A precisão e a calibração dos instrumentos de medição, como piezômetros, são fundamentais para a confiabilidade dos dados coletados. Instrumentos sensíveis e bem calibrados garantem a detecção de variações sutis nas pressões neutras e nos níveis d'água, permitindo uma análise mais precisa do comportamento hidráulico da barragem (MONTES, 2003).

3. Comportamento da Piezometria: O monitoramento contínuo das leituras piezométricas fornece insights sobre a distribuição das pressões neutras dentro do maciço. Alterações inesperadas ou tendências de aumento podem indicar mudanças no regime de fluxo ou desenvolvimento de caminhos preferenciais de percolação, sinais potenciais de processos de *piping* em andamento (MACHADO, 2008).

Esses critérios permitiram interpretar o comportamento hidráulico da barragem simulada, apontando os pontos de maior atenção e contribuindo para a avaliação da segurança da estrutura quanto à ocorrência de *piping*.

3.4. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para assegurar a precisão e coerência das análises bidimensional (2D) e tridimensional (3D) no estudo de percolação em barragens, utilizou-se uma abordagem de validação baseada na comparação dos resultados de ambas as análises em regime permanente. O critério adotado foi a avaliação dos potenciais hidráulicos (cargas hidráulicas) ao longo de uma linha de referência específica, com ênfase na coordenada $z = 0$, correspondente à superfície da barragem (SEEQUENT, 2023).

A escolha da coordenada $z = 0$ como referência deve-se ao fato de que, na superfície da barragem, espera-se que as condições de fluxo sejam mais uniformes e, portanto, mais adequadas para a comparação direta entre os modelos 2D e 3D. Ao longo dessa linha, os valores de carga hidráulica obtidos em ambas as análises foram comparados. Resultados consistentes indicam que as simplificações inerentes ao modelo 2D não comprometem significativamente a precisão dos resultados quando comparados ao modelo 3D mais detalhado (OTTE *et al.*, 2015).

Essa metodologia de validação é respaldada por estudos que enfatizam a importância de comparar resultados de modelos 2D e 3D para garantir a confiabilidade das análises de percolação. O manual técnico da Seequent (SEEQUENT, 2023) ressalta a relevância de experimentos numéricos simples como base para verificação da coerência entre diferentes dimensões de modelagem. De forma complementar, Otte *et al.* (2015) reforçam que a calibração e comparação de respostas numéricas ao longo de seções equivalentes são práticas recomendadas para validação cruzada de simulações em engenharia geotécnica computacional.

Portanto, ao assegurar que os resultados das análises 2D e 3D sejam equivalentes ao longo da linha de referência na superfície da barragem, especialmente na coordenada $z = 0$, confirma-se a precisão e a coerência dos modelos empregados, garantindo a confiabilidade das conclusões obtidas no estudo de percolação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações numéricas realizadas nos módulos SEEP/W 2D e SEEP/W 3D do *software* GeoStudio. A modelagem foi estruturada em fases progressivas com o objetivo de representar a evolução do processo de *piping* em uma barragem de rejeitos, considerando diferentes condições de fluxo, trajetórias preferenciais e cenários críticos. Os resultados foram avaliados com base em critérios previamente definidos na metodologia, tais como a posição da linha freática, os gradientes hidráulicos nas direções horizontal e vertical, e o comportamento da piezometria simulada ao longo das fases.

A comparação entre os modelos bidimensional e tridimensional também compõe esta análise, permitindo observar as vantagens e limitações de cada abordagem e identificar as diferenças nos padrões de percolação simulados. Cada fase será apresentada em sequência, com os respectivos gráficos, cortes representativos e interpretação dos fenômenos observados.

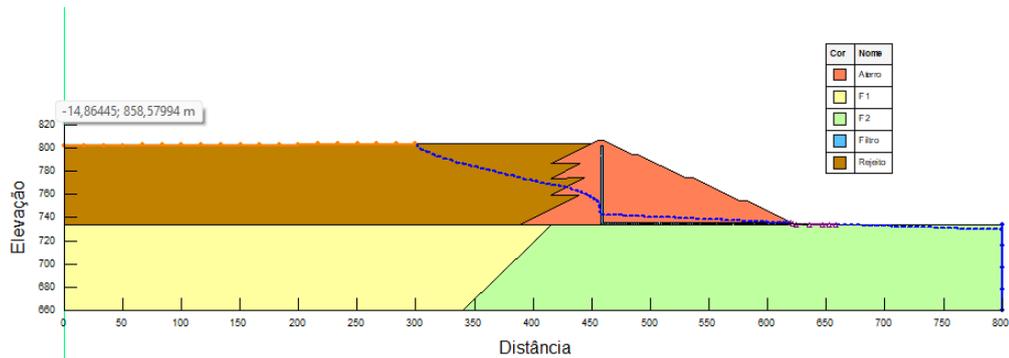
4.1. RESULTADOS DA MODELAGEM 2D

Os resultados obtidos por meio da modelagem bidimensional são apresentados a seguir, destacando os principais aspectos observados em cada fase da simulação.

4.1.1. Linha freática – 2D

A linha freática obtida na modelagem bidimensional representa o limite entre as zonas saturada e não saturada do maciço, sendo caracterizada pela condição de poropressão igual a zero ($u = 0$ kPa). Na análise inicial, seu traçado acompanha a geometria do barramento, iniciando-se no nível do reservatório e descendo suavemente até a região do filtro vertical, com influência clara da atuação eficiente do sistema de drenagem interna. A Figura 26 ilustra esse comportamento, representando a linha freática em regime permanente sem presença de anomalias. Tal posicionamento é coerente com estruturas em regime permanente sem presença de anomalias, conforme apontam Silva (2023) e Seequent (2023).

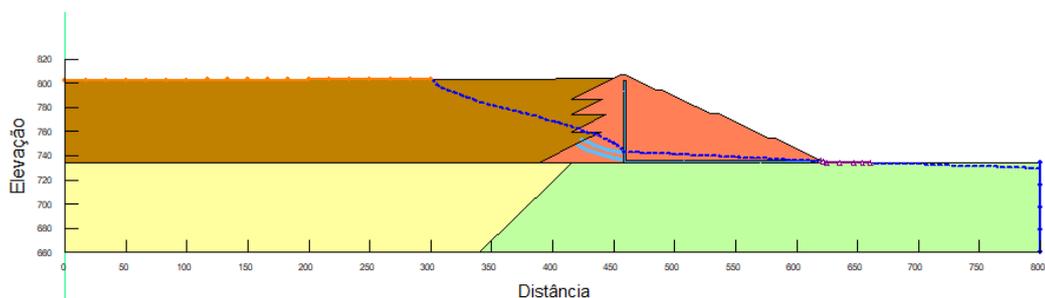
Figura 26 – Linha freática obtida na análise inicial da modelagem bidimensional (2D), representando o regime permanente sem presença de anomalias.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio (SEEQUENT, 2023).

Entretanto, ao se observar a linha freática na fase de *piping* estabelecido, nota-se uma mudança evidente em seu trajeto. A curva apresenta variações mais intensas em pontos específicos, indicando a formação de caminhos preferenciais de escoamento no interior do maciço. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 27, que evidencia as alterações ocorridas na linha freática em função do avanço da erosão interna. Essa alteração é compatível com o avanço do *piping*, que cria trajetórias concentradas de fluxo, reduzindo a carga hidráulica em algumas zonas e influenciando diretamente a estabilidade da estrutura. A comparação entre as duas fases reforça o papel da linha freática como um indicativo importante na detecção de anomalias hidráulicas.

Figura 27 – Linha freática obtida na fase de *piping* estabelecido da modelagem bidimensional (2D), evidenciando alterações no trajeto do fluxo.

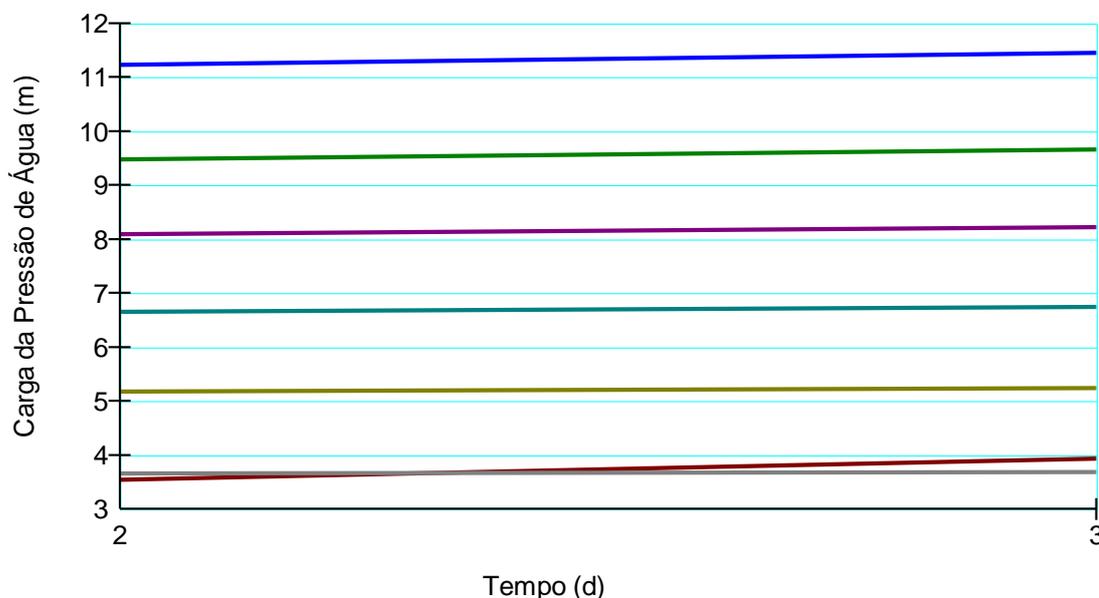


Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio (SEEQUENT, 2023).

4.1.2. Comportamento da Piezometria – 2D

O gráfico apresentado ilustra o comportamento da piezometria durante as quatro fases simuladas da evolução do *piping*, com base nos sete pontos de monitoramento (PZ01 a PZ07) distribuídos ao longo da seção transversal da barragem. Observa-se que os piezômetros localizados nas proximidades do início do canal simulado de erosão interna — como o PZ01 e PZ02 — apresentaram aumento mais significativo na carga de pressão de água à medida que o *piping* se desenvolvia. Esse padrão indica que essas regiões são diretamente influenciadas pelo avanço da anomalia. A Figura 28 representa esse comportamento, demonstrando graficamente as variações de pressão ao longo das fases de simulação nos sete piezômetros analisados.

Figura 28 – Gráfico do comportamento da piezometria ao longo das fases da modelagem 2D.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio (SEEQUENT, 2023).

Por outro lado, os piezômetros mais afastados da região de início da erosão, como o PZ06 e PZ07, mantiveram variações mínimas ao longo das etapas, o que sugere que, até o estágio final simulado, o impacto da canalização preferencial do fluxo ainda não alcançou essas zonas. Tal comportamento está em conformidade com os estudos de Ribeiro (2024) e Seequent (2023), que destacam como o avanço do *piping* tende a afetar progressivamente os pontos mais próximos ao seu trajeto, reforçando a importância da instrumentação piezométrica para a detecção precoce de instabilidades hidráulicas em barragens.

4.1.3. Sensibilidade dos Piezômetros – 2D

Para avaliar a sensibilidade dos piezômetros simulados na modelagem bidimensional, foi realizada uma análise da variação da carga de pressão de água (Δh) entre as diferentes fases de desenvolvimento do *piping* e a condição de regime permanente, considerada como referência (sem erosão interna). O valor de Δh foi obtido pela subtração entre a carga registrada em cada fase e o valor correspondente na análise de fluxo estável.

Os dados utilizados foram extraídos diretamente dos gráficos gerados no SEEP/W, por meio do monitoramento em pontos fixos de cada piezômetro ao longo do tempo. Essa abordagem permitiu acompanhar a resposta hidráulica de cada instrumento ao avanço do canal simulado de erosão interna.

Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 2 e foram utilizados para construir o gráfico da Figura 29. Observa-se que o PZ01, localizado próximo ao início da trajetória de percolação, apresentou comportamento distinto, com variações negativas nas fases iniciais, indicando redução momentânea da poropressão, seguida de um aumento expressivo na fase de *piping* estabelecido. Esse padrão evidencia a influência direta do avanço da erosão no comportamento piezométrico.

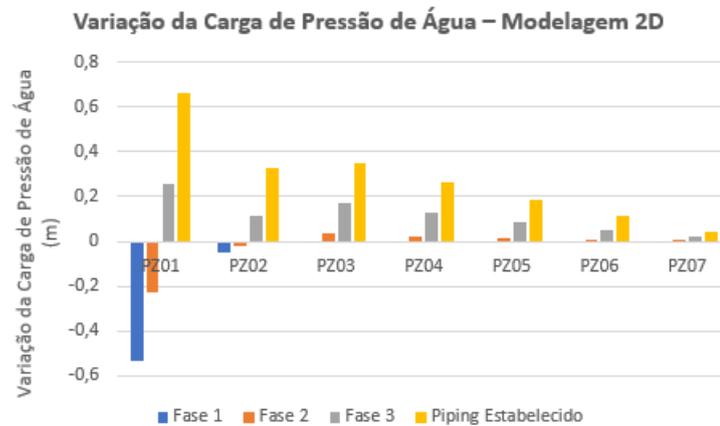
Os demais piezômetros (PZ02 a PZ07) apresentaram variações progressivamente menores, com resposta gradativa ao desenvolvimento do *piping*, indicando que esses instrumentos estão mais afastados da região crítica de fluxo. Mesmo com variações menos intensas, os resultados mostram a utilidade dos piezômetros como ferramentas eficazes para monitoramento de instabilidades hidráulicas em barragens.

Tabela 2 – Variação da carga de pressão de água (Δh) ao longo das fases do *piping* – Modelagem 2D.

Piezômetro	Fase 1	Fase 2	Fase 3	<i>Piping</i> Estabelecido
PZ01	-0,53339	-0,22528	0,25848	0,6595227
PZ02	-0,05163	-0,02386	0,117433	0,329123
PZ03	-0,00862	0,037911	0,172567	0,3523602
PZ04	-0,00849	0,025232	0,126341	0,2642687
PZ05	-0,00702	0,016243	0,087926	0,1870544
PZ06	-0,00472	0,00929	0,053443	0,1149415
PZ07	-0,00212	0,003553	0,021703	0,0466879

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do SEEP/W (SEEQUENT, 2023).

Figura 29 – Variação da carga de pressão de água (Δh) nos piezômetros simulados nas diferentes fases de *piping* na modelagem bidimensional (2D).



Fonte: Elaboração própria com uso do Microsoft Excel (dados extraídos do SEEP/W 2D).

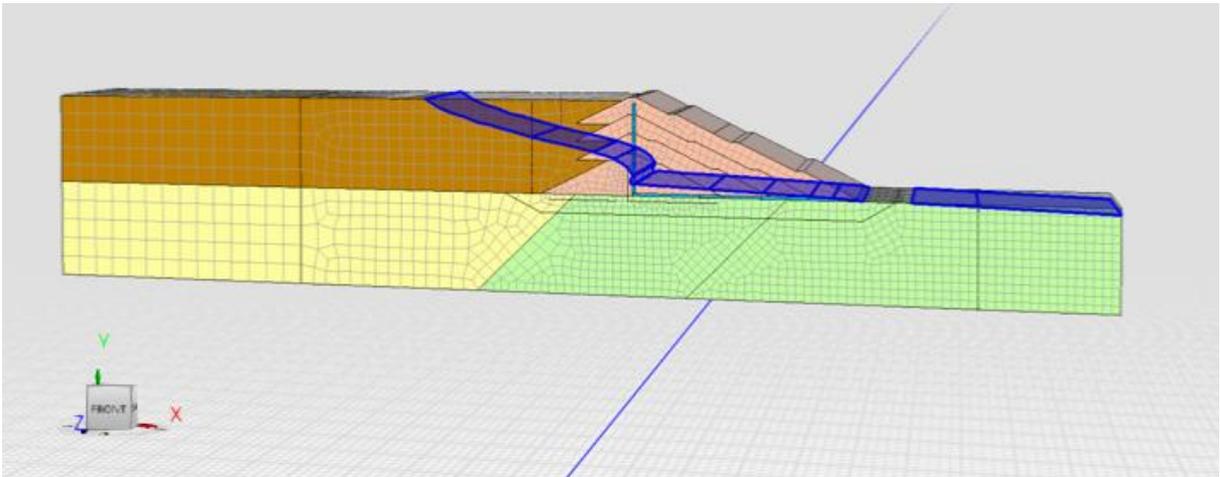
4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS 3D

Os resultados obtidos por meio da modelagem tridimensionais são apresentados a seguir, destacando os principais aspectos observados em cada fase da simulação.

4.2.1. Linha freática – 3D

A análise da linha freática no modelo tridimensional revela mudanças significativas ao longo da evolução do *piping*. Na condição de regime permanente, apresentada na Figura 30, observa-se uma linha freática estável e descendente, com fluxo direcionado de montante para jusante, compatível com o comportamento esperado para estruturas com drenagem interna operando de forma eficaz.

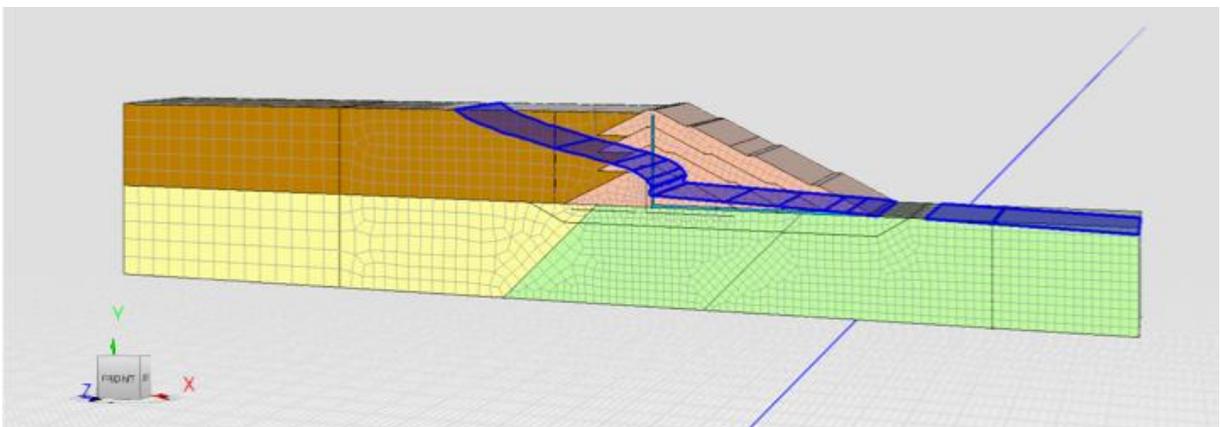
Figura 30 - Linha freática obtida na fase de regime permanente da modelagem tridimensional (3D).



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio (SEEQUENT, 2023).

Já na fase de *piping* estabelecido, representada na Figura 31, a linha freática se eleva perceptivelmente na região central do maciço, especialmente no entorno do canal simulado de erosão interna. Esse comportamento evidencia o acúmulo de poropressão e a perda de eficiência do sistema de drenagem à medida que o *piping* progride. A deformação da trajetória do fluxo nesse estágio reforça a importância da modelagem tridimensional para capturar redistribuições mais complexas que não seriam totalmente identificáveis em simulações bidimensionais (SEEQUENT, 2023; RIBEIRO, 2024).

Figura 31 – Linha freática obtida na fase de *piping* estabelecido na modelagem tridimensional (3D).

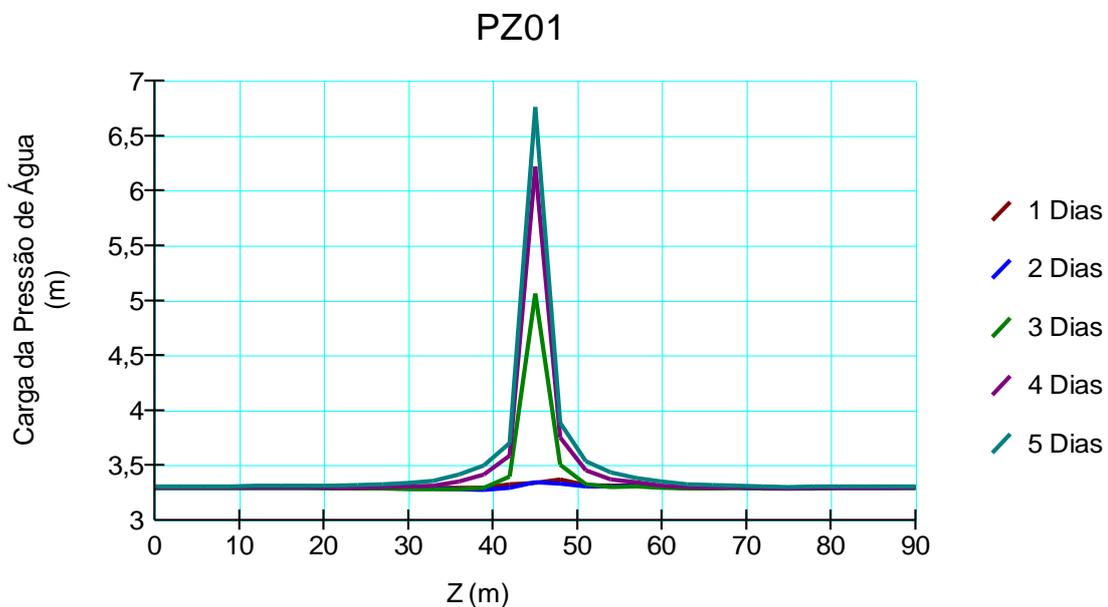


Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio (SEEQUENT, 2023).

4.2.2. Comportamento da Piezometria – 3D

O gráfico apresenta a variação da carga de pressão de água ao longo da coordenada Z no piezômetro PZ01, comparando o regime permanente com as diferentes fases simuladas de evolução do *piping*. A análise está concentrada no ponto de 45 metros, localizado sobre a trajetória principal de fluxo, representando a zona crítica da erosão interna no modelo tridimensional. A Figura 32 ilustra esse comportamento, destacando a sensibilidade do PZ01 às alterações na poropressão ao longo das fases simuladas.

Figura 32 – Variação da carga de pressão de água no PZ01 durante as fases de *piping* no modelo 3D.



Fonte: Elaboração própria com uso do *software* GeoStudio (SEEQUENT, 2023).

A escolha do piezômetro PZ01 como ponto de análise se justifica por sua posição estratégica sobre a região de maior intensidade hidráulica, onde se concentram os efeitos do processo de *piping*. Por estar diretamente inserido na trajetória preferencial do escoamento, esse instrumento se destaca como o mais sensível às variações de poropressão geradas pelo avanço da erosão interna.

Observa-se uma elevação progressiva na carga hidráulica com o avanço das fases, sendo mais acentuada na fase de *piping* estabelecido (linha azul). Essa curva ultrapassa

significativamente o limite de forte detecção ($\pm 2,5$ m), sugerindo que o instrumento localizado neste ponto seria altamente sensível à instabilidade gerada pela erosão interna.

Nas fases iniciais, a resposta se mantém dentro dos critérios de boa (± 5 m) ou baixa detecção (± 10 m), indicando que o aumento da carga ocorre de forma gradual, em concordância com o desenvolvimento do canal de *piping*. O pico registrado no ponto de 45 m reforça a concentração de energia hidráulica nesta região, validando a coerência entre o modelo e a física do processo.

Além de revelar a progressão do *piping*, o gráfico demonstra a eficácia do piezômetro PZ01 como ferramenta de monitoramento preventivo. Sua localização permite detectar alterações no regime de fluxo com alta sensibilidade, evidenciando o papel essencial dos instrumentos piezométricos em projetos de segurança de barragens.

Esse comportamento confirma que a modelagem 3D permite captar variações localizadas de poropressão que muitas vezes passam despercebidas em análises bidimensionais, trazendo maior confiabilidade à interpretação do comportamento hidráulico em situações críticas.

4.2.3. Sensibilidade dos Piezômetros – 3D

Para avaliar a sensibilidade dos piezômetros simulados no modelo tridimensional, elaborou-se um gráfico com base na variação da carga de pressão de água (Δh) ao longo das diferentes fases de evolução do *piping*. O valor de Δh foi obtido pela diferença entre a carga total registrada em cada fase de *piping* estabelecido e o valor correspondente na análise em regime permanente, considerada como condição de referência (sem *piping*).

As cargas foram extraídas a partir dos gráficos gerados no SEEP/W para cada piezômetro, especificamente no ponto $Z = 45$ m, por representar a posição mais próxima da trajetória central do canal de percolação e, portanto, a zona mais crítica de atuação da erosão interna. Essa abordagem permitiu uma comparação direta entre os diferentes estágios da simulação e a resposta de cada ponto de monitoramento frente à progressão da instabilidade hidráulica.

O gráfico de sensibilidade (Figura 33) foi construído a partir dos valores apresentados na Tabela 2. Observa-se que o PZ01 apresentou os maiores incrementos de carga, com destaque para a fase de *piping* estabelecido, na qual Δh ultrapassou 3,4 m. Essa resposta confirma sua localização estratégica e elevada sensibilidade às alterações do regime de fluxo. Já os demais

piezômetros (PZ02 a PZ07) apresentaram respostas progressivamente menos expressivas à medida que se afastam do canal simulado, com variações inferiores a 0,1 m em todos os casos.

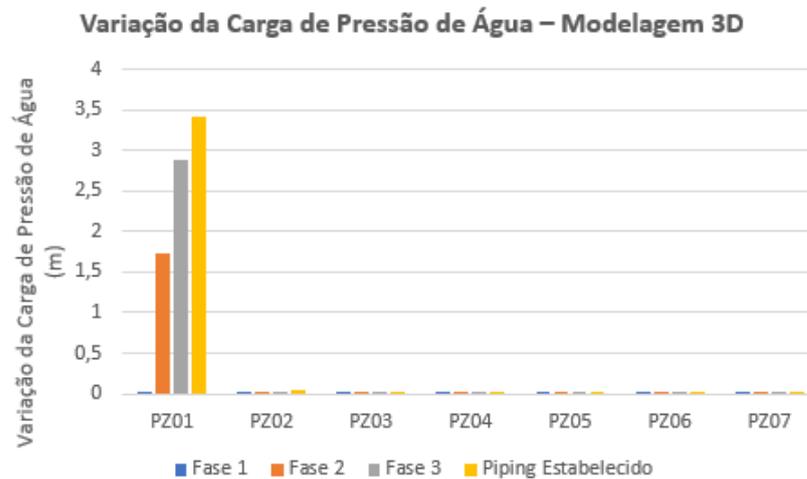
Esses resultados evidenciam que, mesmo em ambiente tridimensional, a instrumentação piezométrica apresenta capacidade de detecção eficaz da evolução do *piping*, sobretudo em pontos posicionados ao longo do trajeto preferencial do fluxo. Essa análise reforça a importância de um projeto de instrumentação bem planejado para a detecção precoce de processos de erosão interna em barragens.

Tabela 3 – Variação da carga piezométrica (Δh) em cada ponto de monitoramento ao longo das fases simuladas de *piping* – Modelagem 3D.

Piezômetro	Fase 1	Fase 2	Fase 3	<i>Piping</i> Estabelecido
PZ01	0,005746	1,72377	2,884197	3,4262994
PZ02	0,000261	0,007984	0,028298	0,051838
PZ03	0,000231	0,004226	0,014516	0,0286537
PZ04	0,000139	0,002697	0,009908	0,0203365
PZ05	8,97E-05	0,001795	0,006795	0,0141589
PZ06	5,07E-05	0,001034	0,003986	0,0083814
PZ07	1,99E-05	0,000415	0,001631	0,0034587

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do SEEP/W (SEQUENT, 2023).

Figura 33 – Variação da carga piezométrica (Δh) em cada ponto de monitoramento ao longo das fases simuladas de *piping* – Modelagem 3D.



Fonte: Elaboração própria com uso do Microsoft Excel (dados extraídos do SEEP/W 3D – SEEQUENT, 2023).

4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos nas modelagens 2D e 3D é fundamentada na compreensão do fluxo de percolação, uma vez que esse escoamento é o fenômeno que impulsiona os gradientes hidráulicos responsáveis pelo desenvolvimento do *piping*. A simulação do fluxo permitiu identificar as trajetórias preferenciais da água, os pontos de concentração de poropressão e a evolução da linha freática ao longo do maciço. Tais elementos foram essenciais para avaliar a resposta dos modelos às diferentes fases da erosão interna. No SEEP/W 2D e SEEP/W 3D, as análises foram conduzidas em regime permanente, o que possibilitou a visualização clara das linhas de fluxo e das zonas críticas de saturação. Esses parâmetros se mostraram decisivos para comparar a sensibilidade dos piezômetros simulados, a precisão na detecção das zonas vulneráveis e a representatividade geométrica de cada abordagem. Dessa forma, o fluxo subterrâneo deixa de ser um elemento secundário e passa a representar o eixo estrutural da interpretação dos resultados obtidos, conferindo base técnica à comparação entre os modelos bidimensional e tridimensional.

A análise comparativa entre os resultados obtidos nas modelagens bidimensional e tridimensional permitiu avaliar com maior profundidade o comportamento do fluxo de percolação e a evolução da erosão interna ao longo das fases simuladas. Embora ambas as abordagens tenham seguido uma lógica de simulação semelhante, as diferenças observadas

entre os modelos realçaram os efeitos significativos da representação volumétrica na compreensão do fenômeno de *piping* em barragens de rejeito.

A partir da linha freática gerada nos dois ambientes, observou-se que a modelagem tridimensional proporcionou uma visualização mais abrangente da superfície de saturação ao longo da barragem, refletindo melhor as variações no espaço. Enquanto no modelo 2D a linha freática apresentou um traçado bem definido, concentrado no plano de corte vertical da seção analisada, no modelo 3D foi possível observar a curvatura da superfície freática ao longo do eixo longitudinal (Z), indicando zonas com maior tendência à saturação ou drenagem lateral. Essa distinção é essencial, pois o *piping* pode se iniciar a partir de pontos específicos não detectáveis em análises planas, sendo a tridimensionalidade crucial para capturar essa complexidade. Além disso, o 3D permite a identificação de zonas críticas ao longo da largura da barragem, contribuindo de forma mais eficaz para o diagnóstico de riscos associados à saturação excessiva (CORREDOR HERRERA, 2019; SEQUENT, 2023).

Com relação ao comportamento da piezometria, os dados extraídos dos piezômetros virtuais indicaram respostas distintas nas duas abordagens. No modelo 2D, a variação da carga de pressão de água seguiu uma progressão uniforme ao longo das fases, com maior destaque nos piezômetros localizados próximos ao início do caminho do *piping*, como o PZ01 e o PZ02. Já no modelo 3D, além de ser possível visualizar com mais precisão a influência do *piping* sobre o PZ01 – que apresentou um pico expressivo de pressão –, os dados também revelaram uma atenuação mais gradual nas respostas dos demais instrumentos. Essa diferença está associada à capacidade do modelo 3D de distribuir melhor as cargas internas no espaço, simulando o escoamento com maior realismo, o que se reflete na suavização de algumas respostas piezométricas. Importante ressaltar que o modelo 3D evidenciou picos de pressão altamente localizados, algo que não foi observado com a mesma intensidade na modelagem bidimensional, reforçando seu potencial como ferramenta de detecção precoce de zonas críticas.

A sensibilidade dos instrumentos também foi analisada em termos de variação da carga de pressão em relação à condição inicial de fluxo normal (regime permanente). No modelo 2D, a sensibilidade foi mais evidente em pontos específicos, especialmente no PZ01, onde os valores de variação entre fases atingiram cerca de 0,7 m. No modelo 3D, entretanto, esse mesmo ponto apresentou variações superiores a 3 m, indicando que a resposta do instrumento nesse ambiente foi amplificada. Isso pode ser explicado pelo fato de o modelo tridimensional representar o volume real de solo que sofre influência do fluxo canalizado, enquanto o modelo 2D representa apenas um corte bidimensional. Tal diferença acentua a importância do uso de

modelos volumétricos quando o objetivo é identificar zonas críticas com maior precisão (ROBBINS; GRIFFITHS, 2018).

A comparação direta entre os dois ambientes evidenciou, portanto, as principais vantagens da modelagem 3D, como a maior precisão na simulação de trajetórias de fluxo, o aumento da sensibilidade dos instrumentos simulados e a possibilidade de observar a evolução espacial do *piping* de maneira mais fidedigna. Além disso, o modelo 3D permitiu avaliar o efeito cumulativo das fases simuladas sobre o comportamento hidráulico de toda a estrutura, o que se torna essencial em análises de segurança de longo prazo.

Contudo, deve-se reconhecer que a modelagem tridimensional também apresenta limitações. O tempo de processamento e a exigência computacional são significativamente maiores em comparação ao modelo 2D, exigindo refinamentos cuidadosos da malha para evitar erros de interpolação ou distorções na simulação. Além disso, o desenvolvimento do modelo tridimensional exige um grau de domínio mais avançado sobre a plataforma GeoStudio, uma vez que o ambiente de modelagem 3D apresenta maior complexidade e não é tão intuitivo quanto o módulo bidimensional. A definição de geometrias sólidas, o manuseio de ferramentas como extrusão, cortes e criação de volumes adicionais, além da necessidade de atenção à continuidade dos elementos de interface e à consistência da malha espacial, demandam conhecimento técnico específico e maior familiaridade com os recursos da interface tridimensional. Por esse motivo, embora o modelo 3D ofereça resultados mais ricos e detalhados, sua aplicação prática exige maior investimento em capacitação e tempo de configuração.

Ainda assim, os resultados obtidos justificam plenamente o uso combinado dos dois modelos. O 2D mostrou-se extremamente útil para compreender a dinâmica inicial do *piping*, testar cenários e obter respostas rápidas, enquanto o 3D se destacou por sua capacidade de representar a estrutura de forma mais realista e identificar potenciais zonas de fragilidade que não seriam detectadas em análises simplificadas. Essa abordagem comparativa fortalece a confiabilidade dos diagnósticos obtidos, além de servir como base para a proposição de medidas de monitoramento e mitigação mais bem direcionadas.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal comparar modelagens numéricas em duas e três dimensões para a análise do fenômeno de *piping* em barragens, com o intuito de identificar as principais diferenças, desafios e contribuições de cada abordagem no diagnóstico dessa anomalia hidráulica. A partir do uso do *software* GeoStudio, foram desenvolvidos dois modelos — bidimensional e tridimensional — aplicados à mesma seção transversal de uma barragem de rejeitos, de forma a garantir coerência na comparação dos resultados.

Com base nos objetivos específicos traçados, foi possível, primeiramente, construir com êxito os modelos numéricos em 2D e 3D utilizando os módulos SEEP/W 2D e 3D. O desenvolvimento desses modelos envolveu etapas como a definição da geometria, inserção de propriedades hidráulicas, aplicação de condições de contorno e simulação progressiva do *piping* em quatro fases. A complexidade do modelo tridimensional exigiu, entretanto, um conhecimento mais aprofundado da plataforma, especialmente por envolver recursos adicionais como extrusão, manipulação de sólidos e cortes geométricos, o que refletiu diretamente no tempo de construção e processamento da análise. Esse contraste atendeu ao segundo objetivo específico, que tratava da comparação das exigências de dados e da complexidade entre os modelos.

Ao longo da avaliação dos resultados, foi possível cumprir também o terceiro objetivo específico, ao observar como os modelos se comportaram em termos de tempo de resposta, capacidade de representar o avanço da erosão interna e aderência às condições reais de fluxo na estrutura. A linha freática simulada no modelo 2D apresentou comportamento coerente com o perfil hidráulico esperado, permitindo a interpretação clara da atuação do sistema de drenagem. No entanto, o modelo 3D possibilitou uma visualização mais completa da superfície piezométrica ao longo do eixo longitudinal da barragem, o que ampliou a compreensão do escoamento lateral e revelou zonas críticas que não seriam perceptíveis em uma análise bidimensional.

Da mesma forma, os dados piezométricos demonstraram boa consistência em ambos os ambientes. O modelo 2D evidenciou a evolução da carga hidráulica com clareza, especialmente em pontos próximos à jusante, como o PZ01. Contudo, a análise tridimensional permitiu avaliar não apenas os valores absolutos de pressão, mas também sua distribuição espacial e variação ao longo da coordenada Z. Essa abordagem trouxe à tona um diferencial importante,

relacionado ao comportamento sensível dos instrumentos de monitoramento quando submetidos ao avanço do *piping*.

Nesse sentido, destaca-se a principal conclusão deste trabalho: embora ambas as modelagens tenham se mostrado eficazes na simulação do *piping*, a modelagem tridimensional demonstrou ser mais eficiente e completa, especialmente por captar aspectos de sensibilidade instrumental que não podem ser avaliados com a mesma profundidade no modelo 2D. Isso se evidenciou, principalmente, na análise da variação piezométrica em resposta ao avanço do canal de erosão. Enquanto no 2D os instrumentos responderam de forma gradativa, o modelo 3D revelou picos de pressão altamente localizados, oferecendo uma leitura mais precisa da influência do fluxo drenante sobre regiões específicas da barragem. Essa sensibilidade espacial só é possível devido à representação volumétrica do fluxo, o que permite simular com maior realismo a canalização interna provocada pelo *piping*.

Ao analisar a aplicabilidade e as limitações de cada técnica, observou-se que a modelagem 2D é mais prática, rápida e intuitiva, sendo adequada para análises preliminares e projetos com menor disponibilidade de dados. Já o modelo 3D, apesar de exigir mais conhecimento técnico, maior tempo de configuração e maior capacidade computacional, oferece um ganho significativo em precisão, interpretação e profundidade dos resultados. Portanto, a escolha da abordagem mais adequada deve considerar o objetivo do estudo, os recursos disponíveis e a necessidade de diagnóstico detalhado.

Por fim, compreendeu-se que o uso integrado das duas abordagens pode ser altamente benéfico, aproveitando a agilidade da modelagem 2D para estudos iniciais e utilizando o potencial do modelo 3D para avaliações mais aprofundadas e estratégicas. A experiência adquirida neste estudo reforça a importância de investir em modelagens tridimensionais quando o objetivo é analisar mecanismos de instabilidade complexos como o *piping*, sobretudo em estruturas críticas como barragens de rejeitos. Os resultados obtidos não apenas respondem aos objetivos propostos, como também contribuem para a discussão atual sobre o uso de ferramentas numéricas na engenharia geotécnica aplicada à segurança de barragens.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das análises desenvolvidas neste estudo, algumas possibilidades de aprofundamento e continuidade são sugeridas:

- Implementar análises acopladas de fluxo e deformação, por meio do uso integrado dos módulos SEEP/W e SIGMA/W, a fim de avaliar não apenas a percolação, mas também os deslocamentos e tensões induzidas pela progressão do *piping* no interior da estrutura. Essa abordagem permitiria simular os efeitos mecânicos da perda de suporte interna e oferecer uma visão mais abrangente sobre os mecanismos de instabilidade envolvidos;
- Aplicar a metodologia de modelagem tridimensional a diferentes tipologias de barragens, como as de enrocamento ou barragens mistas, visando investigar como os parâmetros hidráulicos e a evolução da linha freática se comportam diante de materiais com diferentes condutividades, heterogeneidades internas e geometrias mais complexas. Tal estudo contribuiria para ampliar o escopo de aplicação da modelagem volumétrica em cenários mais variados da engenharia de barragens.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Relatório de segurança de barragens de mineração 2019. Brasília: ANM, 2019.

ALMEIDA, M. M. Estudo tensão deformação de barragem de terra e enrocamento. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS (ASDSO). Baldwin Hills Dam (California, 1963). Disponível em: <https://damfailures.org/case-study/baldwin-hills-dam/>. Acesso em: 03 abr. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Relatório de segurança de barragens 2019. Brasília: ANA, 2020.

CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. A história das barragens no Brasil nos séculos XIX, XX e XXI: 50 anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: Sindicato Nacional dos Editores de Livros, 2011.

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

DIVINO, P. L. Comportamento de enrocamentos em barragens: estudo de caso da Barragem de Emborcação. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

ESTADO DE MINAS. Desastre em imagens: fotógrafos registram a dor e angústia em Mariana. Estado de Minas, 8 nov. 2015. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/11/08/interna_gerais,705630/desastre-em-imagens.shtml. Acesso em: 03 abr. 2025.

FELL, R.; WAN, C. F.; CYGANIEWICZ, J.; FOSTER, M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 129, n. 4, 2003.

FOSTER, M. A.; FELL, R. A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by piping using event tree methods. UNICIV Report No. R-377. Sydney: The University of New South Wales, 1999.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPENCER, P. A.; SYMES, M. A method for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping. UNICIV Report No. R-397. Sydney: University of New South Wales, 1998.

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

FUNDÃO TAILINGS DAM REVIEW PANEL. Report on the immediate causes of the failure of the Fundão Dam. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2016/08/fundao-finalreport.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2025.

IGEOLÓGICO. Barragens – principais tipos e aplicações. Disponível em: <https://igeologico.com.br/voce-sabe-quais-sao-os-tipos-de-barragens/>. Acesso em: 03 abr. 2025.

JESUS, R. D. Otimização da forma estrutural de uma barragem. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

LADEIRA, J. E. R. Barragens de terra e enrocamento: projeto, construção e segurança. 2. ed. Belo Horizonte: Oficina de Textos, 2020.

MAGNO, Fred. Imagem de drone mostra danos em barragem. O Tempo, 2024. Disponível em: <https://www.otempo.com.br>. Acesso em: 03 abr. 2025.

MASSAD, F. Obras de terra: curso básico de geotecnia. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

PIMENTA FILHO, M. A. Avaliação do carreamento de partículas em filtros aplicados a barragens de terra: estudo de caso da Barragem de Balderhead. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 32., 2013, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2013.

PONCE, V. M. Teton Dam failure photos. San Diego: San Diego State University. Disponível em: https://ponce.sdsu.edu/teton_dam_failure_photos.html. Acesso em: 03 abr. 2025.

RIBEIRO, S. Curso Estabilidade e Percolação em Barragens. 2024. Apostila de curso técnico. [S.l.: s.n.].

ROBBINS, B. A.; GRIFFITHS, D. V. Internal erosion of embankments: a review and appraisal. In: Rocky Mountain Geotechnical Conference, 2018, Denver.

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

SOUZA, M. M. de. Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC. 2013. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. Guia de normalização para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFOP. Ouro Preto: UFOP, 2023.

USBR – UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. Design of small dams. 3rd ed. Denver: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2002.

ZANON, B. B. S. Estudo tensão deformação da barragem do Torto. 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.