



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALINNY ALVES DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO NA
ESTABILIDADE DE TALUDES DE UMA BARRAGEM DE TERRA**

Recife

2025

ALINNY ALVES DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO NA
ESTABILIDADE DE TALUDES DE UMA BARRAGEM DE TERRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia

Orientador: José Fernando Thomé Jucá

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Oliveira, Alinny Alves de.

Influência dos sistemas de drenagem e impermeabilização na estabilidade de taludes de uma barragem de terra / Alinny Alves de Oliveira. - RECIFE, 2025.

146f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: José Fernando Thomé Jucá.

Inclui referências e anexo.

1. Barragens de terra; 2. Percolação; 3. Estabilidade. I. Jucá, José Fernando Thomé. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ALINNY ALVES DE OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES DE UMA BARRAGEM DE TERRA

Aprovada em 20/08/2025

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá, UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (examinador externo)
Universidade Federal do Ceará

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Ana Patrícia Nunes Bandeira (examinadora externa)
Universidade Federal do Cariri

participação por videoconferência
Prof. Dr. Antônio Italcy de Oliveira Júnior (examinador externo)
Universidade Federal Rural do Semiárido

AGRADECIMENTOS

Concluir esta dissertação foi um desafio que só se tornou possível graças ao apoio de diversas pessoas às quais sou grata.

Agradeço ao meu orientador, Fernando Jucá, pela orientação técnica, disponibilidade e pelas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, em especial aos professores da área da geotecnia, deixo meu agradecimento pelo conhecimento compartilhado e pelas discussões que enriqueceram minha formação acadêmica.

Aos meus pais, Malena e Elio, agradeço por sempre valorizarem a educação e por terem me direcionado, desde cedo, para este caminho.

Aos meus irmãos, Evellyne e Alexandre, agradeço por estarem presentes na minha vida desde sempre e por tudo que aprendi ao crescer ao lado de vocês.

Agradeço especialmente aos meus amigos Josivan e Selton, que me acolheram em sua casa durante o período de aulas presenciais. Dividir o cotidiano com vocês tornou essa fase muito mais leve e divertida.

Agradeço também aos membros da banca avaliadora pelo tempo dedicado à leitura deste trabalho e pelas contribuições para o seu aprimoramento.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta dissertação.

O sertão está em toda parte, o sertão está dentro da gente. Levo o sertão dentro de mim e o mundo no qual vivo é também o sertão.

(ROSA, 2001).

RESUMO

Este trabalho avalia a influência dos dispositivos de vedação e drenagem no desempenho hidráulico e na estabilidade de uma barragem de terra. Para isso, foram desenvolvidas simulações numéricas utilizando os softwares SEEP/W e SLOPE/W, considerando seis cenários distintos, que combinam ou suprimem os dispositivos mencionados. As análises abrangeram tanto o regime permanente quanto o transiente, representado pela condição de rebaixamento rápido do nível do reservatório. Os resultados demonstraram que os filtros internos desempenham papel fundamental na dissipação das poropressões e na manutenção da estabilidade dos taludes, sendo mais efetivos do que os sistemas de vedação isoladamente. Verificou-se que as configurações compostas por filtro interno associado a apenas um dispositivo de vedação (tapete ou cortina) apresentaram desempenho técnico satisfatório, além de se mostrarem alternativas economicamente viáveis frente à solução completa. O estudo reforça a importância da drenagem interna como principal medida de controle da percolação e estabilidade em barragens de terra, além de destacar a relevância da modelagem numérica como ferramenta de suporte à engenharia geotécnica.

Palavras-chave: Barragens de terra. Percolação. Estabilidade. Modelagem numérica. Drenagem interna.

ABSTRACT

This study evaluates the influence of sealing and drainage systems on the hydraulic behavior and slope stability of an earth dam. Numerical simulations were carried out using SEEP/W and SLOPE/W software, considering six different scenarios that combine or exclude these devices. The analyses encompassed both steady-state and transient conditions, particularly rapid reservoir drawdown. The results demonstrate that internal filters play a key role in dissipating pore pressures and maintaining slope stability, proving more effective than sealing systems alone. Configurations with internal filters combined with only one sealing device (either the impermeable blanket or the grout curtain) exhibited satisfactory technical performance and emerged as cost-effective alternatives compared to the complete solution. This research highlights the critical role of internal drainage in controlling seepage and ensuring the stability of earth dams, as well as the importance of numerical modeling as a support tool for geotechnical engineering.

Keywords: Earth dams. Seepage. Stability. Numerical modeling. Internal drainage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Seções típicas de barragens de terra realizadas pela CANAMBRA, com sistemas combinados de vedação e drenagem. (a) Água Vermelha; (b) Capivara; (c) Três Irmãos.	18
Figura 2.2 – Seções típicas de barragens de terra.....	20
Figura 2.3 – Feições comuns em rochas sedimentares	23
Figura 2.4 - Observação de surgência de água em junta de cisalhamento sub-horizontal em maciço arenítico, formação Cabeças, Bacia do Parnaíba (PI).....	23
Figura 2.5 - Variação do nível do reservatório, deslocamento lateral da crista e recalque da crista da barragem Cherry Valley.	28
Figura 2.6 - Seção esquemática de barragem de terra com dispositivo de vedação composto por tapete de impermeabilização em montante.	30
Figura 2.7 - Arranjo típico de cortina de injeção em fundação rochosa.	32
Figura 2.8 - Barragem de terra com sistema de drenagem com trincheira drenante	37
Figura 2.9 - Modos de ruptura típicos em barragens de terra.....	39
Figura 2.10 – Esquema de instalação de um medidor de nível d’água.....	44
Figura 2.11 – Tipos de medidores de vazão	45
Figura 2.12 – Esquema de instalação de marco superficial	46
Figura 2.13 - Detalhes da sonda do inclinômetro, seção do tubo guia ranhurado e direção das leituras.	48
Figura 2.14 - Representação esquemática da linha freática e dos parâmetros geométricos na solução de Casagrande para análise de fluxo em barragens de terra.	50
Figura 3.1 – Seção estudo utilizada para o estudo paramétrico	61
Figura 3.2 – Malha de elementos finitos utilizada para as análises de fluxo e estabilidade	64
Figura 3.3 – Inserção dos dados dos materiais no modelo do <i>SEEP/W</i>	67
Figura 3.4 - Inserção das condições de contorno no modelo do <i>SEEP/W</i>	68
Figura 3.5 – Tipos de análises realizadas pelo <i>SEEP/W</i>	69
Figura 3.6 - Inserção dos dados dos materiais no modelo do <i>SLOPE/W</i>	72
Figura 3.7 - Inserção da superfície de pesquisa no modelo do <i>SLOPE/W</i>	73
Figura 3.8 – Localização dos instrumentos da barragem estudo	74
Figura 4.1 – Disposição dos instrumentos na seção estudo	81
Figura 4.2 – Gráfico dos registros do piezômetro 01.....	81
Figura 4.3 - Gráfico dos registros do piezômetro 02	82
Figura 4.4 - Gráfico dos registros do piezômetro 03	83
Figura 4.5 - Gráfico dos registros do piezômetro 04	83
Figura 4.6 - Gráfico dos registros do marco superficial 01.....	84
Figura 4.7 - Gráficos dos registros do inclinômetro 01	85
Figura 4.8 – Simulação 01 com anisotropia do aterro de $Kh=1,5Kv$ e função de condutividade hidráulica variável.....	86
Figura 4.9 – Simulação 02 com $Kh=2,0Kv$ e função de condutividade hidráulica constante .	88
Figura 4.10 - Simulação 03 com $Kh=2,0Kv$ e função de condutividade hidráulica variável..	89
Figura 4.11 – Seção modelada para o caso 01 do estudo	91
Figura 4.12 – Carga total e vetores de fluxo - Caso 01.....	92
Figura 4.13 – Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 01	94
Figura 4.14 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 01	94

Figura 4.15 – Carga total no rebaixamento rápido – Caso 01	96
Figura 4.16 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 01	97
Figura 4.17 - Seção modelada para o caso 02 do estudo.	98
Figura 4.18 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 02	99
Figura 4.19 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 02	100
Figura 4.20 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 02	100
Figura 4.21 - Carga total no rebaixamento rápido – Caso 02.....	102
Figura 4.22 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 02	103
Figura 4.23 - Seção modelada para o caso 03 do estudo.	104
Figura 4.24 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 03	106
Figura 4.25 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 03	107
Figura 4.26 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 03	108
Figura 4.27 - Carga total no rebaixamento rápido – Caso 03.....	109
Figura 4.28 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 03	110
Figura 4.29 - Seção modelada para o caso 04 do estudo	112
Figura 4.30 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 04	113
Figura 4.31 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 04	114
Figura 4.32 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 04	115
Figura 4.33 - Carga total no rebaixamento rápido – Caso 04.....	116
Figura 4.34 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 04.....	117
Figura 4.35 - Seção modelada para o caso 05	118
Figura 4.36 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 05	119
Figura 4.37 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 05	120
Figura 4.38 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 05	121
Figura 4.39 - Carga total no rebaixamento rápido – Caso 05.....	122
Figura 4.40 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 05	123
Figura 4.41 - Seção modelada para o caso 06	124
Figura 4.42 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 06	126
Figura 4.43 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 06	127
Figura 4.44 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 06	128
Figura 4.45 - Carga total no rebaixamento rápido – Caso 06.....	129

Figura 4.46 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 06 130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Casos históricos de ruptura de barragens para acumulação de água	40
Tabela 2.2 - Evolução cronológica das resoluções da ANA sobre segurança de barragens	57
Tabela 3.1 – Casos para estudo paramétrico	63
Tabela 3.2 – Parâmetros de permeabilidade dos materiais que compõem a barragem estudo.	65
Tabela 3.3 – Parâmetros de resistência utilizados na modelagem.....	70
Tabela 3.4 – Registros dos piezômetros da barragem estudo.....	75
Tabela 3.5 - Registros dos medidores de vazão da barragem estudo	76
Tabela 3.6 - Registros dos marcos superficiais da barragem estudo	77
Tabela 3.7 - Registros dos inclinômetros da barragem estudo	78
Tabela 4.1 – Instrumentos instalados na seção estudo.....	80
Tabela 4.2 – Valores de carga total obtidos na simulação 01	86
Tabela 4.3 - Valores de carga total obtidos na simulação 02	88
Tabela 4.4 - Valores de carga total obtidos na simulação 03	89
Tabela 4.5 – Fatores de segurança obtidos para o Caso 01	97
Tabela 4.6 - Valores obtidos para o Caso 02.....	103
Tabela 4.7 - Valores de fator de segurança obtidos para o Caso 03	111
Tabela 4.8 - Valores obtidos para o Caso 04.....	117
Tabela 4.9 – Valores de fator de segurança obtidos para o Caso 05	124
Tabela 4.10 - Valores de fator de segurança obtidos para o Caso 06	131
Tabela 4.11 – Fatores de segurança obtidos nas análises.....	131
Tabela 4.12 – Resultados de carga total obtidos nas análises.	132

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo.....	16
1.1.1 Objetivos específicos.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Barragens de terra	17
2.1.1 Definição e características gerais.....	17
2.1.2 Materiais e critérios de projeto	19
2.1.3 Tipos de fundações e interações com o maciço	21
2.2 Poropressão em barragens de terra	24
2.2.1 Conceitos de pressão neutra	24
2.2.2 Efeitos em regimes permanente e transiente	26
2.3 Controle de Percolação.....	29
2.3.1 Importância da percolação no desempenho de barragens e riscos associados à percolação excessiva	29
2.3.2 Dispositivos de Vedaçāo	30
2.3.3 Dispositivos de Drenagem	34
2.4 Ruptura de barragens de terra.....	38
2.4.1 Mecanismos típicos de ruptura	38
2.4.2 Casos históricos.....	40
2.5 Instrumentação de barragens.....	41
2.5.1 Piezômetros	42
2.5.2 Medidores de nível d'água.....	43
2.5.3 Medidores de vazão	45
2.5.4 Marcos superficiais	46
2.5.5 Inclinômetros.....	47
2.6 Modelagem numérica em barragens.....	49
2.6.1 Princípios da análise de fluxo	49
2.6.2 Estabilidade de taludes por equilíbrio limite	52
2.6.3 Integração entre simulações hidráulicas e mecânicas	54
2.7 Critérios de projeto e normas técnicas.....	55
2.7.1 Normas brasileiras	55
2.7.2 Diretrizes internacionais.....	57
3. METODOLOGIA	60
3.1 Apresentação do estudo de caso	60

3.1.1	<i>Análise paramétrica dos dispositivos de vedação e drenagem.....</i>	62
3.2	Modelagem das seções para o estudo paramétrico	63
3.2.1	<i>Análises de fluxo para os regimes permanente e transiente</i>	64
3.2.2	<i>Análises de estabilidade por equilíbrio limite.....</i>	70
3.3	Instrumentação da barragem	73
3.3.1	<i>Calibração do modelo.....</i>	78
4.	RESULTADOS	80
4.1	Análise dos registros da instrumentação da seção estudo	80
4.2	Calibração do modelo numérico.....	85
4.3	Análise paramétrica da seção estudo	89
4.3.1	<i>Caso 01 – Situação com dois sistemas de vedação associados à drenagem</i>	90
4.3.2	<i>Caso 02 – Situação com somente drenagem.....</i>	97
4.3.3	<i>Caso 03 – Situação com somente vedação</i>	104
4.3.4	<i>Caso 04 – Situação com somente cortina de injeção associada à drenagem..</i>	111
4.3.5	<i>Caso 05 - Situação com somente tapete impermeável associado à drenagem</i>	117
4.3.6	<i>Caso 06 – Situação sem vedação e sem drenagem</i>	124
4.4	Análise conjunta dos resultados	131
5.	CONCLUSÕES.....	135
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	136
	REFERÊNCIAS.....	137
	ANEXO A – RESULTADO DAS SONDAZENS	145

1. INTRODUÇÃO

As barragens de terra são estruturas amplamente utilizadas para armazenamento de água, controle de cheias e disposição de rejeitos. Entretanto, essas estruturas são sensíveis aos processos de percolação, que, quando não adequadamente controlados, podem comprometer sua estabilidade e segurança (FELL et al., 2015).

Historicamente, observa-se que grande parte dos acidentes e falhas em barragens de terra está relacionada ao aumento da poropressão e aos processos de erosão interna e instabilidade dos taludes, sobretudo em condições de carregamentos transitórios, como enchimento ou rebaixamento rápido do reservatório (DUNCAN; WRIGHT; WONG, 2014).

Diante desse cenário, Cerqueira (2017) avalia que o projeto adequado dos dispositivos de controle de percolação e alívio de pressões neutras é fundamental para garantir o desempenho seguro da barragem. Componentes como filtros internos, tapetes impermeáveis e cortinas de injeção são empregados com o objetivo de reduzir gradientes hidráulicos e controlar o regime de fluxo no interior do maciço.

Além disso, o desenvolvimento e aprimoramento de ferramentas de modelagem numérica têm possibilitado uma análise mais precisa do comportamento hidráulico e da estabilidade dessas estruturas. *Softwares* de análise numérica permitem avaliar cenários de regime permanente e transiente, considerando a distribuição da poropressão e seus efeitos na estabilidade dos taludes.

Adicionalmente, a evolução dos sistemas de monitoramento em tempo real tem proporcionado uma gestão mais eficiente da segurança de barragens. O uso de piezômetros, inclinômetros e outros instrumentos permite acompanhar a evolução do comportamento da estrutura, contribuindo para a detecção precoce de anomalias e para a tomada de decisões fundamentadas.

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência dos dispositivos de vedação e drenagem, especificamente filtros internos, tapetes impermeáveis e cortinas de injeção, no desempenho hidráulico e na estabilidade de uma barragem de terra. Por meio de análises numéricas, busca-se compreender como esses elementos, de forma isolada e combinada, contribuem para o controle das poropressões e melhoria das condições de estabilidade dos taludes, tanto em regime permanente quanto em situações de rebaixamento rápido do nível do reservatório.

O desenvolvimento deste estudo tem como finalidade fornecer subsídios técnicos para o aprimoramento de projetos de barragens de terra, especialmente no que se refere ao controle da percolação e à segurança estrutural. Espera-se que os resultados obtidos possam colaborar com a definição de critérios mais robustos para a seleção e o dimensionamento de sistemas de vedação e drenagem.

1.1.1 *Objetivos específicos*

Para o alcance do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver modelos numéricos representativos do fluxo de percolação e das condições de estabilidade da barragem, utilizando os softwares SEEP/W e SLOPE/W.
- Simular diferentes cenários operacionais, variando as combinações de dispositivos de vedação e drenagem, tanto de forma isolada quanto conjunta.
- Avaliar a influência dos dispositivos de controle na distribuição da carga hidráulica, nas linhas equipotenciais e nos vetores de fluxo no interior do maciço, em regime permanente.
- Analisar o comportamento da barragem sob condição de rebaixamento rápido do nível do reservatório, verificando os efeitos sobre a dissipação das poropressões e os fatores de segurança.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O item de revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar os principais conceitos, fundamentos e critérios técnicos relacionados ao comportamento, projeto e segurança de barragens de terra. Para isso, serão abordados definições fundamentais, aspectos construtivos, mecanismos de percolação e ruptura, além de diretrizes normativas e métodos de análise comumente empregados em estudos geotécnicos aplicados a essas estruturas.

2.1 Barragens de terra

As barragens de terra constituem uma das tipologias mais utilizadas no mundo para armazenamento e controle de recursos hídricos, devido à viabilidade técnica e econômica proporcionada pelo uso de materiais locais. Neste subtópico, serão abordadas as definições e características gerais destas estruturas, os materiais empregados na construção e os critérios de projeto usualmente adotados, bem como os tipos de fundações e suas interações com o maciço, considerando aspectos relevantes à estabilidade e ao desempenho geotécnico ao longo da vida útil da barragem.

2.1.1 Definição e características gerais

Barragens de terra são estruturas construídas para reter ou desviar volumes de água, com finalidades como abastecimento, irrigação, controle de cheias e geração de energia. Sua concepção baseia-se nos princípios da mecânica dos solos e da geologia de engenharia, exigindo criteriosa seleção dos materiais, investigação geotécnica adequada e controle tecnológico rigoroso ao longo das etapas de projeto e construção (CRUZ, 2004).

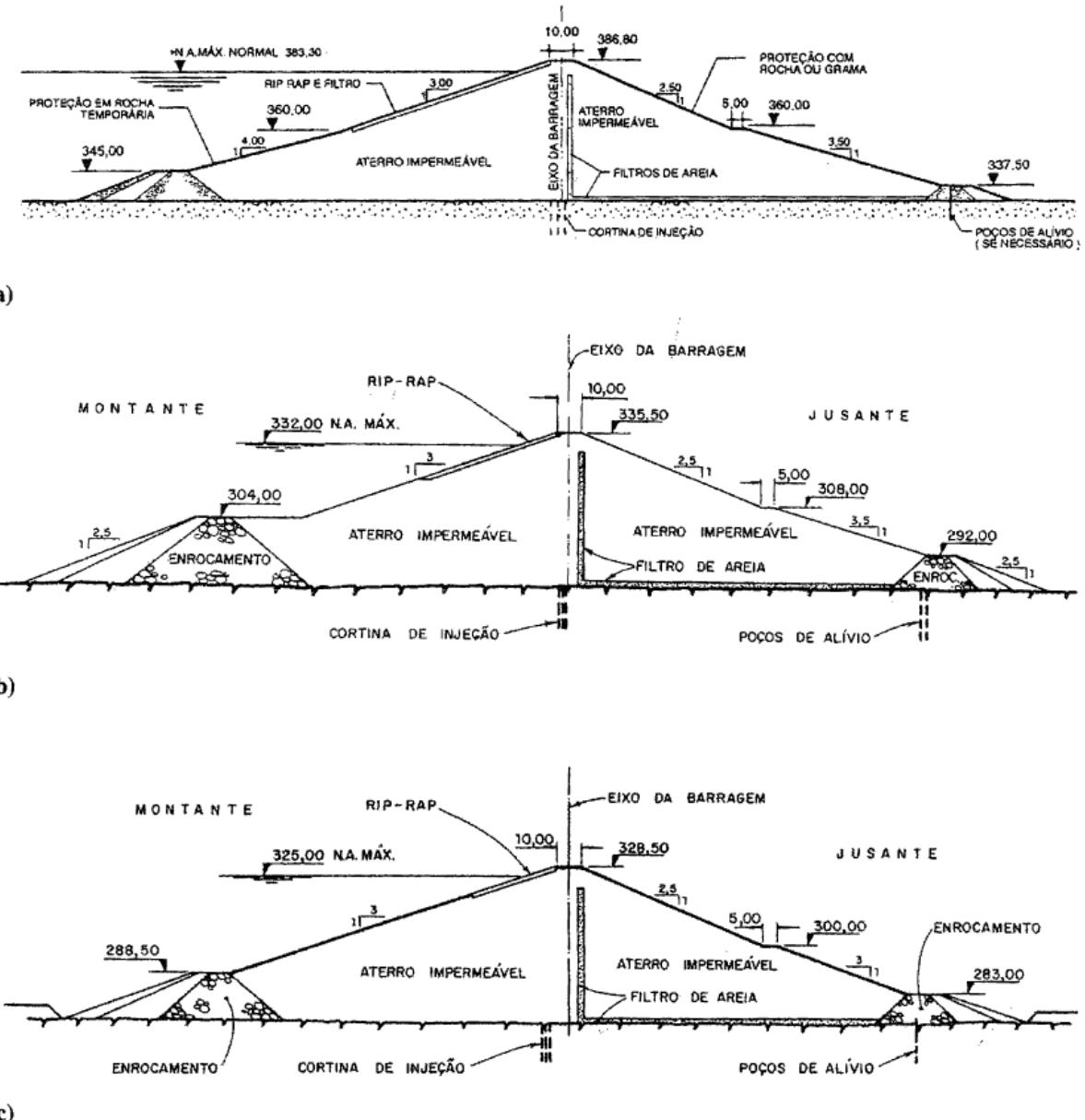
De acordo com Marques (2019), barragens de terra distinguem-se das demais tipologias estruturais pelo uso predominante de solos em sua composição, sendo comuns os arranjos em zonas com diferentes funções, como barreiras hidráulicas, filtros e suportes estruturais. O desempenho da estrutura depende da interação entre os materiais utilizados e as condições de carregamento e drenagem impostas durante a vida útil do barramento.

Dentre os estudos de referência para o desenvolvimento de barragens de terra no Brasil, destaca-se a contribuição da consultora CANAMBRA (*Canadian Brazilian Engineering Ltd*), que atuou em diversos projetos a partir da década de 1960. Seus estudos forneceram diretrizes fundamentais para o dimensionamento de barragens, incorporando elementos como filtros verticais e horizontais, tapetes impermeáveis e cortinas de injeção. Essas configurações

buscavam otimizar o desempenho hidráulico do maciço e controlar eficientemente os fluxos de percolação, principalmente em fundações muito permeáveis (CRUZ, 2004).

A Figura 2.1 ilustra seções típicas adotadas em barragens como Água Vermelha, Capivara e Três Irmãos, evidenciando a aplicação combinada desses dispositivos de vedação e drenagem (CRUZ, 2004).

Figura 2.1 - Seções típicas de barragens de terra realizadas pela CANAMBRA, com sistemas combinados de vedação e drenagem. (a) Água Vermelha; (b) Capivara; (c) Três Irmãos.



Fonte: Cruz (2004)

A estabilidade de barragens de terra está diretamente relacionada às condições hidráulicas internas do maciço. Fredlund e Rahardjo (1993) destacam que, em solos não

saturados, a presença de succção matricial exerce influência estabilizadora importante, especialmente durante o período construtivo e em ciclos de secagem. A consideração desse fator no projeto permite obter estimativas mais realistas do fator de segurança em taludes não drenados.

Segundo Rodrigues et al. (2022), as variações sazonais de umidade em barragens de terra no Brasil podem alterar significativamente a succção dos solos compactados, afetando o estado tensional e, consequentemente, a estabilidade global dos taludes. O estudo recomenda a inclusão de análises baseadas no conceito de succção e de estados de umidade variáveis nos modelos de previsão de comportamento.

A utilização de materiais locais, como solos saprolíticos e lateríticos, também tem sido avaliada como alternativa econômica e tecnicamente viável. Lima (2021), ao investigar o comportamento de misturas de solo laterítico com areia, observou valores adequados de permeabilidade e resistência ao cisalhamento para aplicações em zonas internas de barragens, desde que associados a procedimentos rigorosos de controle de umidade e compactação.

Nos últimos anos, estudos acadêmicos nacionais têm contribuído para o aprimoramento das práticas de projeto e análise dessas estruturas. Santos (2020), destaca o uso de *softwares* como o *Geostudio* na simulação de fluxos e na análise da estabilidade de taludes, ressaltando que tais ferramentas proporcionam maior precisão na definição de filtros, transições e na avaliação de diferentes cenários operacionais, como rebaixamentos rápidos do nível do reservatório.

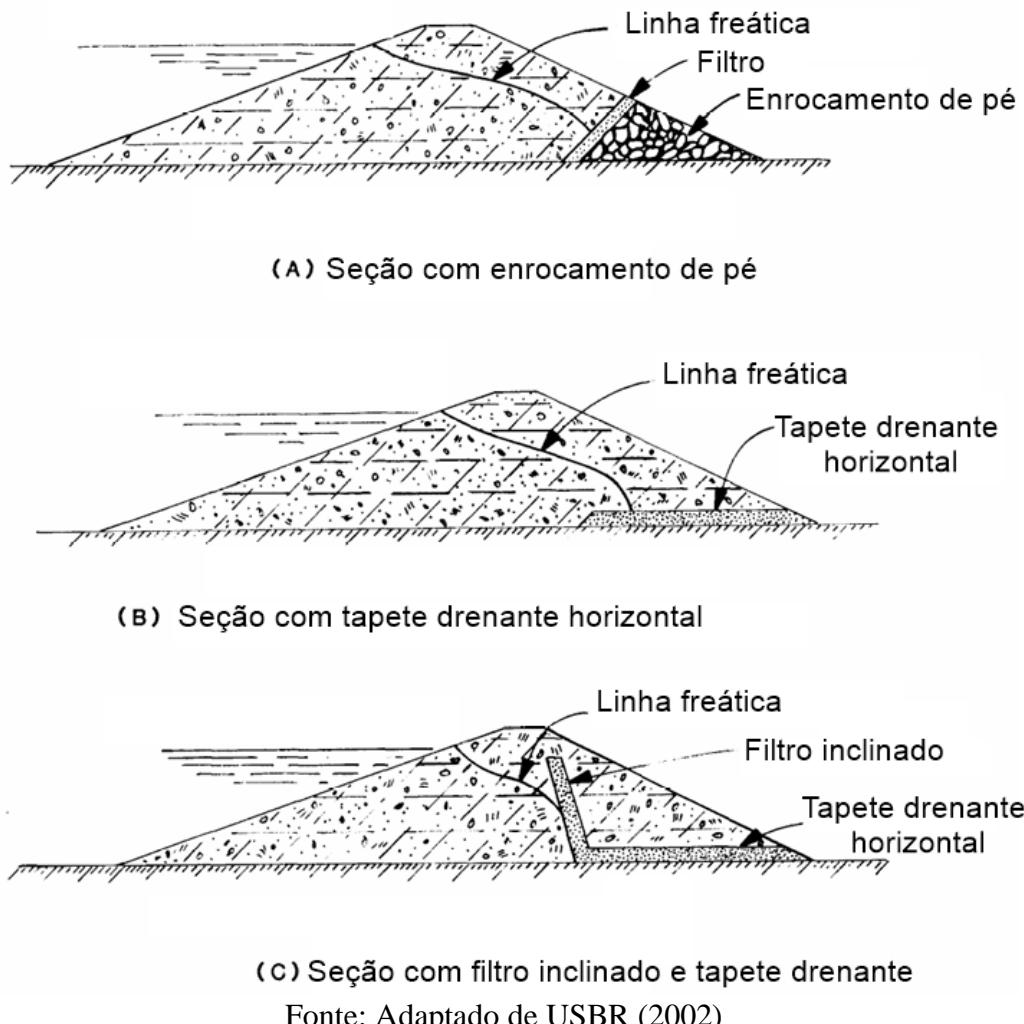
Com a promulgação da Portaria nº 70.389/2017 pela Agência Nacional de Mineração (ANM), e os avanços regulatórios promovidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), consolidou-se no país a exigência de critérios mais robustos para o projeto e operação de barragens. Segundo Oliveira (2023), tais normativas reforçam a necessidade de integração entre os aspectos técnicos, ambientais e de segurança, desde a concepção da obra até a fase de operação.

2.1.2 *Materiais e critérios de projeto*

A seleção dos materiais para construção de barragens de terra deve considerar suas propriedades geotécnicas e hidráulicas, garantindo desempenho seguro e eficiente ao longo da vida útil da estrutura. De acordo com a USBR (2002), o tipo de barragem (homogênea ou zoneada) é geralmente definido com base na disponibilidade e qualidade dos materiais locais, nos métodos construtivos e nas características da fundação. Em projetos com materiais

adequados, solos argilosos são priorizados para o núcleo impermeável, enquanto solos mais granulares, como areias e siltes, são utilizados nas zonas filtro e de transição (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Seções típicas de barragens de terra



Fonte: Adaptado de USBR (2002)

Segundo Massad (2010), a disposição dos materiais deve seguir o zoneamento projetado, aproveitando os mais permeáveis nos espaldares e os menos permeáveis na região central do maciço. Para isso, é necessário avaliar parâmetros como granulometria, plasticidade, densidade seca e umidade ótima de compactação.

De acordo com Das (2010), a composição ideal de uma barragem de terra depende da combinação de três zonas fundamentais: zona impermeável (núcleo), zonas de suporte (espaldares) e sistemas de drenagem. A zona impermeável geralmente utiliza solos argilosos com baixa permeabilidade e plasticidade moderada, enquanto as zonas de suporte podem ser compostas por areias, cascalhos ou enrocamento compactado, desde que compatíveis com as deformações esperadas. A uniformidade da granulometria é essencial para prevenir caminhos preferenciais de fluxo, especialmente nas interfaces entre diferentes materiais.

A NBR 13028:2017 estabelece parâmetros técnicos obrigatórios para caracterização dos materiais utilizados no maciço da barragem. Os estudos devem abranger propriedades como densidade *in situ*, densidade dos grãos, umidade natural, granulometria, limites de consistência, coeficiente de permeabilidade, grau de alteração, além dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação. Esses dados são essenciais para as análises de estabilidade, adensamento e recalque, além de subsidiar o dimensionamento das zonas impermeáveis, filtros e drenos.

Conforme demonstrado por Pierozan (2014), ensaios laboratoriais como o Proctor, cisalhamento direto e permeabilidade são indispensáveis para caracterização adequada dos solos utilizados. Esses ensaios subsidiam a definição da espessura dos filtros e do núcleo, além das condições ideais de compactação para controle da percolação e estabilidade do talude.

Dunnicliff (1993) ressalta que a heterogeneidade natural dos solos exige que os critérios de projeto levem em consideração não apenas os parâmetros médios obtidos em laboratório, mas também a variabilidade espacial das propriedades geotécnicas. O autor enfatiza a importância da observação de campo durante e após a construção, afirmando que a combinação entre projeto adequado e monitoramento eficiente permite identificar comportamentos inesperados relacionados aos materiais utilizados. Além disso, Dunnicliff destaca que os filtros devem ser compostos por materiais uniformemente graduados, de forma a garantir simultaneamente a retenção de partículas finas e a drenagem eficiente, minimizando o risco de erosão interna e colapsos localizados.

A norma brasileira NBR 13028:2017 define que, em projetos de barragens, são obrigatórias a definição de taludes compatíveis com a estabilidade global e local, a análise de recalques esperados, e a previsão de dispositivos de controle e dissipação de energia para escoamentos superficiais. A norma ainda recomenda a inclusão de simulações numéricas e ensaios complementares em laboratório ou campo, com validação dos parâmetros adotados, especialmente em barragens de maior porte ou complexidade técnica.

2.1.3 *Tipos de fundações e interações com o maciço*

As fundações das barragens são elementos fundamentais para a estabilidade e o desempenho estrutural da obra, sendo diretamente influenciadas pelas características geomecânicas do maciço de apoio. De acordo com a CBDB (2010), fundação de barragem é definida como a parte do vale que está sob a estrutura e a sustenta, abrangendo tanto o talvegue quanto as encostas, que ficam abaixo do maciço. As barragens de terra, por sua flexibilidade,

podem ser assentadas sobre diversos tipos de fundações, desde que adequadamente tratadas. Já as barragens de concreto exigem fundações com elevadas resistências e baixa deformabilidade, como rochas sãs e pouco fraturadas.

O comportamento do maciço da fundação influencia diretamente na concepção da barragem. Em situações em que o substrato apresenta elevada permeabilidade, é necessário prever tratamentos como cortinas de injeção, tapetes impermeáveis e filtros adequados, a fim de evitar processos de percolação excessiva e erosão interna. Segundo Marangon (2004), barragens de terra apresentam maior capacidade de adaptação a fundações menos resistentes, desde que os critérios de deformabilidade e permeabilidade sejam respeitados e controlados.

A NBR 13028:2017 estabelece que as fundações devem garantir a estabilidade global da estrutura e evitar mecanismos de ruptura como deslizamentos e recalques diferenciais. A norma exige a consideração de fatores como grau de fraturamento, condutividade hidráulica e estado de alteração da rocha de fundação. Além disso, recomenda a realização de estudos complementares com sondagens e classificação geomecânica do maciço, como os sistemas RMR (Classificação do Maciço Rochoso) e RQD (Índice de Qualidade da Rocha).

Entre os tipos mais comuns de fundações utilizadas em barragens de terra, destacam-se os solos aluviais, solos coluvionares, solos lateríticos tropicais e diversas litologias rochosas, como rochas ígneas (granitos e basaltos) e rochas sedimentares (arenitos, siltitos e argilitos). Conforme descrito por Souza (2013), barragens de terra podem ser construídas sobre fundações relativamente deformáveis, desde que adotadas medidas de controle de percolação e reforço estrutural. Em regiões semiáridas, as barragens são frequentemente assentadas sobre rochas sedimentares brandas, como arenitos da Formação Barreiras, cuja elevada porosidade e fraca coesão impõem cuidados adicionais no projeto.

A Figura 2.3 apresenta algumas das feições característica que podem ser encontradas em rochas sedimentares, decorrentes de processos erosivos.

Figura 2.3 – Feições comuns em rochas sedimentares



Fonte: NIEBLE, C. M.; GUIDICINI, G.; MELLO, L. G (2021)

Nos casos de barragens fundadas em arenitos brandos, Jarouche (2011) destaca que esses materiais possuem elevada porosidade e suscetibilidade à erosão interna, além de baixa resistência à compressão, o que os torna inadequados para estruturas muito rígidas. A interação entre a água e o maciço de arenito é apontada como uma das principais causas de instabilidade, devido à formação de canais de lixiviação e ao aumento localizado da permeabilidade (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Observação de surgência de água em junta de cisalhamento sub-horizontal em maciço arenítico, formação Cabeças, Bacia do Parnaíba (PI)



Fonte: NIEBLE, C. M.; GUIDICINI, G.; MELLO, L. G (2021)

Vieira (2021) também indica que fundações constituídas por arenitos ou argilitos apresentam predominantemente classificações RMR abaixo de 40, o que caracteriza maciços de qualidade pobre ou muito pobre. Nesses casos, recomenda-se a adoção de estruturas de barragens com características mais tolerantes à deformação, como as de gravidade ou de terra homogênea, com sistemas reforçados de vedação e drenagem interna.

2.2 Poropressão em barragens de terra

O controle da poropressão é um dos aspectos mais relevantes no comportamento hidráulico e geotécnico de barragens de terra, uma vez que sua variação influencia diretamente a estabilidade dos taludes e a segurança da estrutura. Este tópico aborda os principais fundamentos teóricos acerca da poropressão, sua relação com a tensão efetiva e os impactos decorrentes de sua distribuição no interior do maciço, com ênfase nas análises em regimes permanente e transiente.

2.2.1 Conceitos de pressão neutra

A pressão neutra (ou poropressão, u) é a parcela da tensão total no solo que é exercida pela água presente nos poros. O conceito é central na teoria da tensão efetiva, formulada por Terzaghi (1943), que define que a tensão efetiva (σ') é a diferença entre a tensão total (σ) e a pressão neutra:

$$\sigma' = \sigma - u \quad \text{Equação 1}$$

Essa equação expressa que a resistência ao cisalhamento do solo depende diretamente da tensão efetiva. Dessa forma, variações na poropressão afetam diretamente a estabilidade dos taludes de barragens de terra. Durante o enchimento do reservatório, por exemplo, ocorre um aumento na pressão neutra dentro do maciço, o que, se não for adequadamente dissipado, pode provocar redução significativa do fator de segurança e potencial instabilidade.

A interação entre a teoria da tensão efetiva, formulada por Terzaghi (1943), e a Lei de Darcy constitui a base fundamental para a análise do comportamento hidráulico e mecânico dos solos em obras geotécnicas. A Lei de Darcy, proposta por Henry Darcy em 1856, é um dos fundamentos da hidráulica de solos e descreve o escoamento de água através de meios porosos. Sua forma básica, aplicada a condições de fluxo unidimensional, é dada por:

$$q = -k \cdot \frac{dh}{dx} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

q é a vazão específica (ou velocidade de percolação);

k é o coeficiente de permeabilidade do solo;

$\frac{dh}{dl}$ representa o gradiente hidráulico, ou seja, a variação da carga hidráulica ao longo de uma distância.

O gradiente hidráulico, é a razão entre a perda de carga hidráulica e o comprimento do percurso. Esse parâmetro governa a energia disponível para o escoamento e, por consequência, influencia diretamente a velocidade e a direção do fluxo da água no solo. De acordo com Lambe e Whitman (1979), a aplicação da Lei de Darcy também é válida para fluxos em meios parcialmente saturados, desde que se considerem as relações não lineares entre o conteúdo de água, a sucção e a condutividade hidráulica.

No contexto de barragens de terra, a Lei de Darcy é essencial para estimar as vazões de percolação através do maciço e das fundações. O coeficiente de permeabilidade (k) é um parâmetro altamente dependente da estrutura do solo, da presença de fissuras e da compactação. Solos argilosos compactados, por exemplo, podem apresentar valores de k da ordem de 10^{-9} a 10^{-7} m/s, enquanto areias podem atingir 10^{-5} a 10^{-3} m/s, conforme determinado por Casagrande e Fadum (1940). Essa diferença de ordens de grandeza implica grandes variações na resposta hidráulica do sistema e, por consequência, na evolução da poropressão.

Além do fluxo vertical, a Lei de Darcy também se aplica ao fluxo horizontal, sendo imprescindível no projeto de elementos de segurança hidráulica da barragem. Em análises bidimensionais e tridimensionais, a Lei de Darcy é generalizada para vetores de fluxo, considerando anisotropias do meio. Nessas condições, o fluxo é calculado por:

$$\vec{q} = -K \cdot \nabla h \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

q é a vazão

K é a matriz de permeabilidade (em meios anisotrópicos);

∇h é o gradiente do potencial hidráulico.

A solução da equação de Darcy em meios tridimensionais pode ser complementada pela equação de Laplace. A equação governante é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(ky \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kz \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{Equação 4}$$

Nessa expressão, K_x , K_y e K_z são os coeficientes de permeabilidade nas direções x, y e z, respectivamente.

Essa equação é amplamente utilizada na engenharia de barragens para modelar o regime de percolação em condições permanentes e transientes, permitindo prever a distribuição da carga hidráulica, das linhas de fluxo e da poropressão, informações fundamentais para o dimensionamento de sistemas de drenagem e para a análise de estabilidade do maciço (RAPOSO, 2016).

2.2.2 *Efeitos em regimes permanente e transiente*

O comportamento da poropressão no interior de barragens de terra varia significativamente conforme o regime de fluxo estabelecido no maciço, sendo classificado, de forma geral, como regime permanente ou regime transiente.

Em regime permanente, o fluxo de água atinge um estado estável, no qual as linhas de carga hidráulica e as distribuições de poropressão permanecem constantes ao longo do tempo. Por outro lado, no regime transiente, o escoamento está associado a variações nas condições de contorno, como enchimento inicial, rebaixamento rápido do reservatório ou flutuações sazonais, o que provoca alterações temporárias na distribuição da poropressão (RAPOSO, 2016).

No regime permanente, as poropressões são estabilizadas em função do equilíbrio entre as cargas hidráulicas a montante e jusante, refletindo um estado em que as vazões de entrada e saída do maciço se equilibram. Nesse contexto, segundo Das (2010), o efeito da poropressão torna-se previsível, permitindo que a linha freática e os gradientes hidráulicos sejam modelados de forma estática, o que é fundamental para a análise de estabilidade dos taludes em condições operacionais normais.

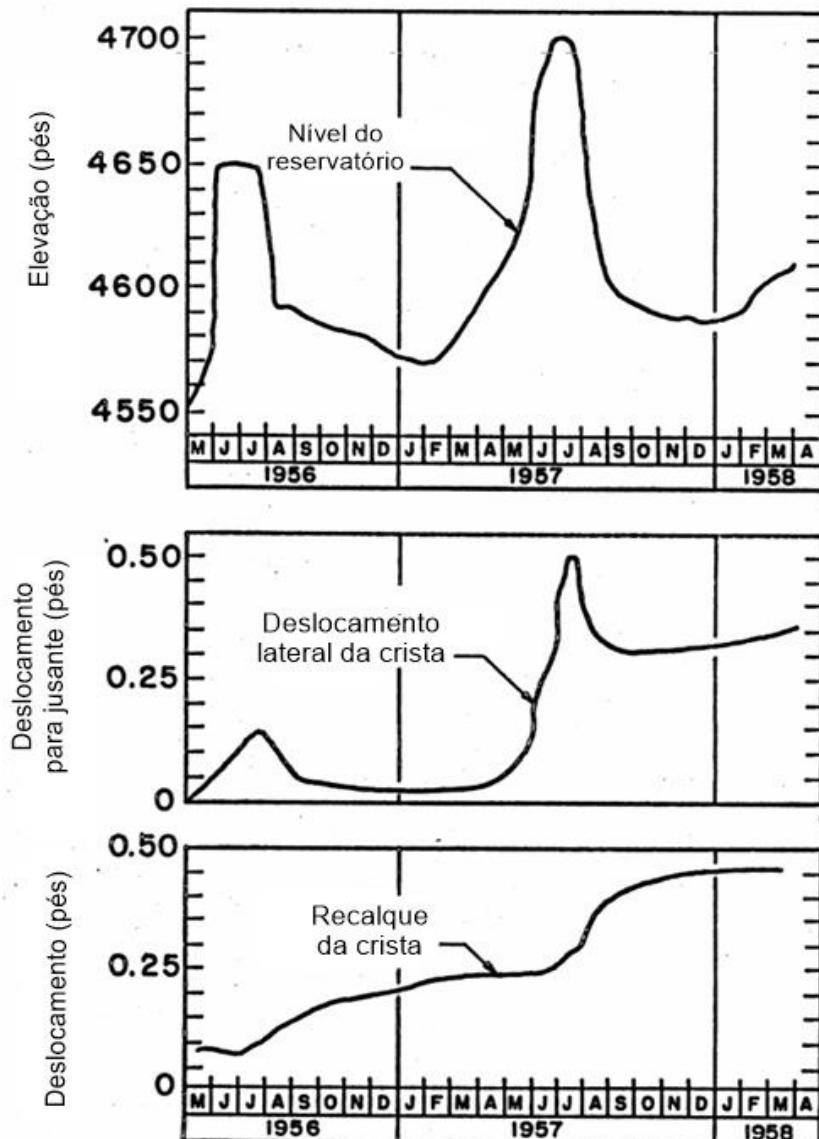
Por outro lado, os efeitos da poropressão no regime transiente são significativamente mais críticos, pois a água no interior do maciço não responde instantaneamente às variações externas.

A Figura 2.5 apresenta a relação entre a elevação do nível do reservatório e os deslocamentos da crista da barragem Cherry Valley, monitorada durante os anos de 1956 a 1958. A imagem é composta por três gráficos que ilustram, respectivamente, (i) a variação do nível do reservatório, (ii) o deslocamento lateral da crista no sentido jusante e (iii) o recalque vertical da crista, em função do tempo (NOBARI; DUNCAN, 1972).

Observa-se, no primeiro gráfico, que as flutuações no nível do reservatório provocam variações diretas nas respostas deformacionais da barragem. Durante os períodos de rápida elevação da lâmina d'água, verifica-se, nos gráficos inferiores, um aumento significativo tanto no deslocamento horizontal para jusante quanto no recalque da crista. Este comportamento é característico de regimes transientes, nos quais o incremento da carga hidráulica promove o aumento das poropressões no interior do maciço, sem que haja tempo suficiente para sua dissipação completa (NOBARI; DUNCAN, 1972).

Por outro lado, quando o nível do reservatório se estabiliza, observa-se que a taxa de deslocamento tende a diminuir, indicando a transição para o regime permanente, no qual o fluxo se estabiliza, a linha freática atinge sua posição definitiva e as poropressões internas se equilibram. Isso reforça que as maiores taxas de deformação ocorrem durante os períodos de carregamento hidráulico não estabilizado, diretamente relacionados ao comportamento transiente do fluxo (NOBARI; DUNCAN, 1972).

Figura 2.5 - Variação do nível do reservatório, deslocamento lateral da crista e recalque da crista da barragem Cherry Valley.



Fonte: Adaptado de Nobari e Duncan (1972)

Já durante um rebaixamento rápido do nível do reservatório, o talude de montante sofre uma súbita redução da carga hidráulica externa, mas a água dentro do solo não tem tempo suficiente para se redistribuir ou drenar, mantendo a poropressão elevada internamente. Isso resulta na redução temporária da tensão efetiva e, consequentemente, do fator de segurança, podendo levar à instabilização do talude (MODERTO; PRETTO; PEDROZZO, 2019).

Esse fenômeno foi evidenciado nos estudos de Modesto (2019), que, ao realizar simulações computacionais de uma barragem de terra, identificou que, enquanto os fatores de segurança em regime permanente atendiam aos critérios normativos, na condição de rebaixamento rápido o fator de segurança do talude de montante caiu para valores inferiores

aos mínimos exigidos, refletindo a influência direta da poropressão não dissipada sobre a estabilidade.

Além disso, Raposo (2016) destaca que, em barragens de terra, o tempo necessário para que a poropressão atinja o equilíbrio está diretamente relacionado à permeabilidade dos materiais, à geometria do maciço e às condições operacionais. Solos argilosos, com permeabilidades da ordem de 10^{-9} a 10^{-7} m/s, apresentam dissipação extremamente lenta da poropressão, sendo mais susceptíveis aos efeitos adversos do regime transiente. Por outro lado, materiais mais permeáveis, como areias e cascalhos, permitem uma adaptação mais rápida às variações externas.

2.3 Controle de Percolação

O controle da percolação constitui uma das principais medidas para garantir a estabilidade e a segurança de barragens de terra. Esse controle envolve a adoção de dispositivos que atuam tanto na redução das vazões percoladas quanto na mitigação dos gradientes hidráulicos, prevenindo processos de erosão interna, surgências, subpressões elevadas e possíveis instabilidades. A definição de sistemas adequados de vedação e drenagem é fundamental para assegurar o desempenho estrutural da barragem ao longo de sua vida útil.

2.3.1 *Importância da percolação no desempenho de barragens e riscos associados à percolação excessiva*

O controle da percolação em barragens de terra é um dos aspectos mais relevantes para garantir sua estabilidade e segurança. A movimentação da água através do maciço e da fundação influencia diretamente tanto a estabilidade quanto a durabilidade da estrutura, podendo gerar efeitos adversos como subpressões elevadas, erosão interna (piping) e, em casos mais severos, levar à ruptura da barragem (MIRANDA, 2009).

A percolação não controlada pode provocar gradientes hidráulicos excessivos, os quais resultam em forças de percolação capazes de reduzir as tensões efetivas dos solos, levando à instabilização de taludes, surgências na jusante e até processos de liquefação ou levantamento do fundo (MIRANDA, 2009). Esse fenômeno é particularmente crítico quando a barragem se encontra assentada sobre fundações altamente permeáveis, como areias, pedregulhos ou depósitos aluvionares, condição comum em diversos empreendimentos no Brasil.

Casos históricos de acidentes em barragens reforçam a importância do controle adequado da percolação. A ruptura da barragem de Baldwin Hills (EUA) em 1963, por exemplo, foi diretamente associada a falhas no controle das forças de percolação, com surgências e erosão interna nas fundações (CRUZ, 1996). No Brasil, eventos como os registrados na barragem de Porto Primavera e na barragem de Curuá-Una também ilustram como a ausência de medidas eficazes de controle pode comprometer a segurança da estrutura (CRUZ, 1996).

Além dos riscos estruturais, a percolação excessiva também representa perdas operacionais associadas ao volume de água perdido, afetando a eficiência de usinas hidrelétricas e outros empreendimentos que dependem do armazenamento de água (FELL et al., 2014). Portanto, adotar soluções de vedação, drenagem e controle de gradientes hidráulicos é fundamental para assegurar não apenas a segurança física da barragem, mas também sua funcionalidade ao longo do tempo.

2.3.2 *Dispositivos de Vedaçāo*

Os dispositivos de vedação têm como função principal reduzir a percolação através do maciço e da fundação da barragem. Sua adoção é essencial para garantir a segurança e pode ser feita por meio de dispositivos como tapetes impermeáveis, cortinas de injeção e *cut-offs*.

2.3.2.1 Tapetes impermeáveis

Os tapetes impermeáveis são dispositivos de vedação empregados nas fundações de barragens, localizados geralmente na região de montante, com o objetivo principal de reduzir as vazões de percolação através do contato barragem-fundação e, consequentemente, os gradientes hidráulicos no interior do maciço e na fundação. Sua função está diretamente associada à minimização dos riscos de surgência, erosão interna e perda de material, contribuindo significativamente para a estabilidade da estrutura (FELL et al., 2014).

Estes dispositivos consistem em camadas de solo de baixa permeabilidade, geralmente argila ou solos argilosos, compactados sobre a fundação na região a montante da barragem (Figura 2.6). Quando adequadamente dimensionados, promovem um aumento significativo no comprimento do trajeto de percolação (caminho de fluxo), reduzindo os gradientes hidráulicos e as pressões neutras no interior do maciço e nas fundações (DAS, 2013).

Figura 2.6 - Seção esquemática de barragem de terra com dispositivo de vedação composto por tapete de impermeabilização em montante.



Fonte: MIRANDA (2009)

De acordo com o Manual de Orientação aos Empreendedores de Barragens (ANA, 2014), os tapetes impermeáveis podem ser aplicados isoladamente ou em combinação com outros dispositivos de vedação, como cortinas de injeção ou núcleos impermeáveis. Sua utilização é particularmente recomendada em fundações constituídas por materiais permeáveis, onde a percolação não controlada representa risco significativo à estabilidade.

A eficiência dos tapetes está relacionada a fatores como extensão em relação ao eixo da barragem, espessura, qualidade do material e grau de compactação. A literatura recomenda que a extensão do tapete seja, preferencialmente, de três a cinco vezes a altura da lâmina d'água para garantir sua efetividade no controle do fluxo (FELL et al., 2014).

Os tapetes impermeáveis são considerados uma solução de custo relativamente baixo, quando comparados às cortinas de injeção profundas, e oferecem excelente desempenho quando bem executados. No entanto, sua adoção exige criteriosa avaliação geotécnica da fundação, especialmente quanto à possibilidade de erosão superficial ou interna na interface do tapete com os materiais subjacentes (USBR, 2002).

A espessura do tapete é geralmente definida entre 0,5 m e 2,0 m, a depender da granulometria e da permeabilidade dos materiais utilizados. É fundamental que o material empregado apresente baixa permeabilidade, sendo preferencialmente composto por argilas ou solos predominantemente argilosos de boa plasticidade e elevada capacidade de compactação. A adequada execução dos procedimentos de compactação é determinante para o desempenho hidráulico do tapete, uma vez que deficiências na compactação podem gerar caminhos preferenciais de fluxo e comprometer sua eficácia (DAS, 2013).

Do ponto de vista da modelagem de fluxo, o dimensionamento deve ser verificado por meio de análises numéricas ou métodos clássicos de traçado de linhas de fluxo e equipotenciais. Essas análises permitem avaliar a efetividade do tapete na redução das linhas equipotenciais na fundação e na contenção das subpressões. Quando o tapete é adotado isoladamente, é imprescindível assegurar que o gradiente hidráulico na borda jusante do tapete não exceda os

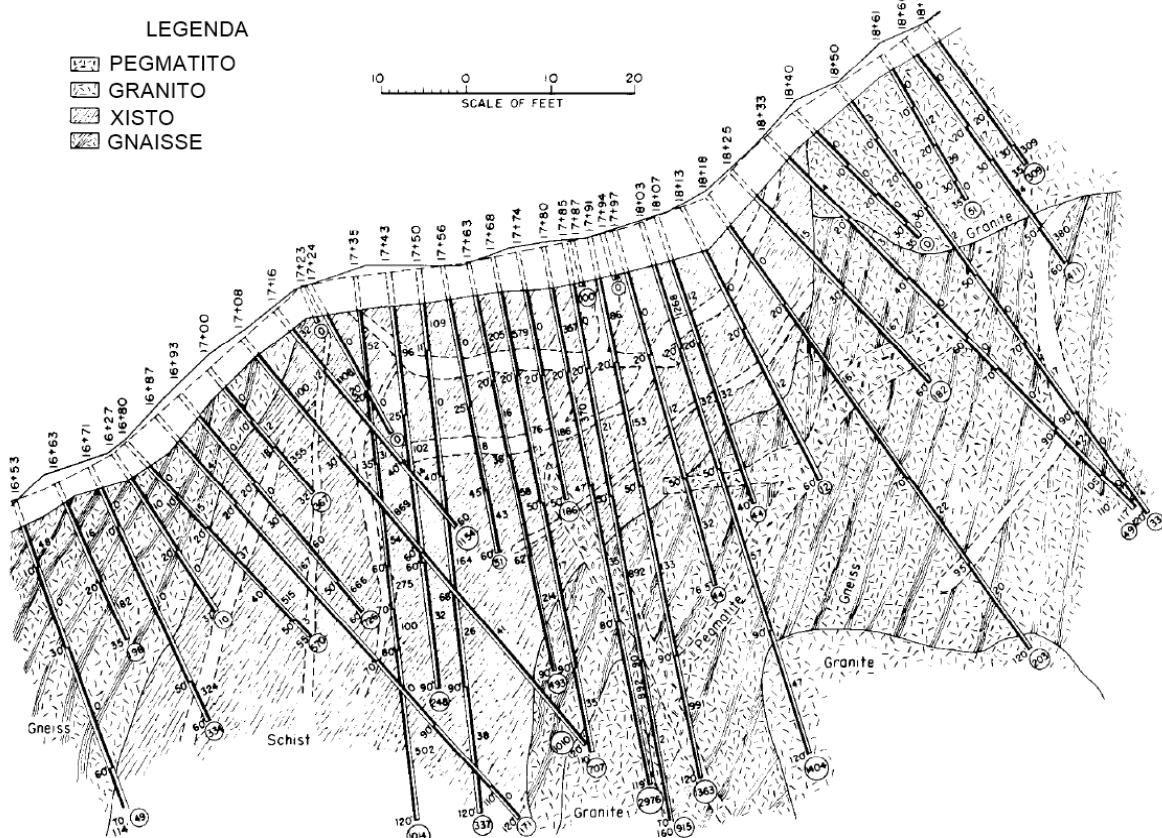
valores críticos, geralmente considerados entre 0,3 e 0,5 para solos arenosos, e até 1,0 para solos coesivos de maior resistência à erosão (FELL et al., 2014).

2.3.2.2 Cortinas de injeção

As cortinas de injeção são dispositivos de vedação executados por meio da introdução de calda de cimento, ou misturas especiais, no interior da fundação da barragem, com o objetivo de reduzir a permeabilidade das rochas, ao preencher as fraturas (Figura 2.7). Esses dispositivos atuam diretamente no controle da percolação, limitando as vazões e os gradientes hidráulicos, além de minimizar riscos associados à erosão interna e ao surgimento de subpressões excessivas (FELL et al., 2014).

De acordo com *Design of Small Dams* (USBR, 2002), as cortinas de injeção são particularmente indicadas em fundações constituídas por materiais altamente permeáveis, como rochas fraturadas, onde os tapetes impermeáveis podem não ser suficientes. As cortinas são normalmente executadas na forma de uma ou mais fileiras de furos perfurados ao longo do eixo da barragem, preenchidos com calda de cimento sob pressão, criando uma barreira vertical à percolação.

Figura 2.7 - Arranjo típico de cortina de injeção em fundação rochosa.



Fonte: Adaptado de USBR (2002)

O Manual de Orientação aos Empreendedores de Barragens da ANA reforça que o dimensionamento das cortinas de injeção deve levar em consideração a profundidade da camada permeável, o grau de fraturamento da rocha, as condições geotécnicas locais e o nível máximo operacional da barragem. Além disso, o manual destaca que, frequentemente, as cortinas são utilizadas em conjunto com outros dispositivos de vedação, como tapetes impermeáveis, proporcionando uma solução integrada e mais eficiente para o controle da percolação (ANA, 2014).

Segundo Das (2013), o espaçamento entre os furos, a profundidade da cortina e a pressão de injeção são parâmetros fundamentais no desempenho do sistema. A eficiência da cortina depende, principalmente, da correta execução dos furos e do controle rigoroso da injeção, de modo a garantir o preenchimento adequado das descontinuidades no solo ou na rocha. Deficiências nesses aspectos podem gerar zonas preferenciais de fluxo, comprometendo a eficácia do dispositivo.

Miranda (2009) ressalta que, embora as cortinas de injeção representem uma solução eficaz para a redução das vazões percoladas, seu desempenho deve ser constantemente monitorado, especialmente em barragens implantadas sobre fundações heterogêneas ou altamente permeáveis.

Em levantamento apresentado por Cruz (1996), a adoção de cortinas de injeção em barragens brasileiras mostrou-se uma solução eficiente em diversos empreendimentos, especialmente naqueles construídos sobre fundações rochosas fraturadas. Apesar de seu custo ser superior ao de outras soluções, como os tapetes impermeáveis, a sua aplicação é indispensável em situações onde há risco elevado de percolação não controlada, reforçando a importância desse dispositivo no contexto da engenharia de barragens.

2.3.2.3 Trincheira de vedação (*Cut-off*)

As trincheiras de vedação (*Cut-off*) são elementos de vedação empregados no controle da percolação em barragens de terra, atuando na redução do fluxo de água através da fundação. Sua função é criar uma barreira física capaz de aumentar o comprimento do trajeto de percolação e reduzir os gradientes hidráulicos, contribuindo significativamente para a estabilidade e segurança da estrutura.

A definição da tipologia do *cut-off* está diretamente associada às características geológicas e hidrogeológicas da fundação. Em fundações compostas por solos de permeabilidade moderada, costuma-se adotar trincheiras superficiais, com profundidade limitada até a primeira camada de menor permeabilidade. Já em fundações constituídas por

materiais mais permeáveis, como depósitos aluvionares espessos ou rochas fraturadas, torna-se necessária a execução de *cut-offs* profundos, que podem alcançar dezenas de metros de profundidade, garantindo sua continuidade até uma camada efetivamente impermeável (USBR, 2002).

Quanto à espessura, sua definição varia em função do tipo de material utilizado e dos esforços envolvidos. Para trincheiras preenchidas com solo argiloso, a largura costuma variar entre 1,5 m e 4 m, sendo suficiente para garantir continuidade hidráulica e estabilidade da escavação. No caso de paredes moldadas em concreto plástico ou solo-bentonita, larguras típicas variam entre 0,6 m e 1,2 m, com elevada eficiência hidráulica, além de menor deformabilidade e maior resistência estrutural (DAS, 2013).

Apesar de sua eficácia, o desempenho dos *cut-offs* deve ser avaliado considerando as limitações associadas à execução. Estudos de casos brasileiros, como apontado por Cruz (1996), evidenciam que falhas no preenchimento, recalques diferenciais ou processos de segregação podem gerar caminhos preferenciais de fluxo, comprometendo sua efetividade. Por isso, é prática comum a adoção de sistemas combinados, nos quais o *cut-off* funciona em conjunto com drenagens internas e filtros, formando uma barreira hidráulica robusta.

2.3.3 *Dispositivos de Drenagem*

Os dispositivos de drenagem exercem papel fundamental no controle das pressões neutras e na estabilidade das barragens de terra. Sua função é coletar e conduzir de forma segura as vazões percoladas, reduzindo subpressões no interior do maciço e na fundação. Entre os principais elementos utilizados destacam-se os filtros internos, os poços de alívio e as trincheiras drenantes, que atuam de forma complementar na gestão do regime de fluxo dentro da estrutura.

2.3.3.1 Filtros internos

Os filtros internos são componentes fundamentais no sistema de drenagem de barragens de terra e enrocamento, atuando na retenção de partículas finas e no controle da percolação. A função primária dos filtros é garantir que a água escoe livremente, sem permitir o arraste de partículas finas, prevenindo, assim, mecanismos de erosão interna, que são uma das principais causas de ruptura de barragens (SILVA, 2016).

De acordo com Divino (2010), os filtros devem ser concebidos para atender simultaneamente dois critérios fundamentais: retenção e permeabilidade. O material filtrante

deve possuir vazios suficientemente pequenos para impedir a migração de partículas do solo protegido e, ao mesmo tempo, apresentar alta permeabilidade, garantindo a drenagem eficiente da água infiltrada.

O processo de dimensionamento dos filtros baseia-se na análise granulométrica do solo de base e do próprio material filtrante. Conforme abordado por Silva (2016), são adotados critérios clássicos como os de Terzaghi e os aperfeiçoamentos propostos por Sherard e Dunnigan (1985), Foster e Fell (1999) e órgãos como o USBR (2011) e o USACE (2004). Os critérios granulométricos estabelecem, por exemplo, que o diâmetro D15 do filtro deve ser menor que 4 a 5 vezes o D85 do solo protegido, garantindo a retenção, e que o D15 do filtro deve ser, no mínimo, 4 vezes o D15 do solo de base para assegurar adequada permeabilidade.

Silva (2016) demonstra, por meio de ensaios laboratoriais, que mesmo quando os critérios teóricos são atendidos, o desempenho hidráulico e a capacidade de retenção do filtro podem ser sensivelmente influenciados por fatores como grau de compactação, distribuição de vazios, angularidade dos grãos e presença de finos. Esses fatores devem ser cuidadosamente controlados na fase de execução.

Divino (2010) ressalta ainda que, em barragens sobre fundações heterogêneas ou com materiais de enrocamento, os filtros devem ser concebidos de forma zonada, com transições granulares progressivas, evitando a ocorrência de colmatação e mantendo a eficácia do sistema ao longo da vida útil da estrutura.

Segundo Santos (2023), a avaliação da estabilidade interna dos solos e a verificação da eficácia dos filtros devem considerar não apenas os critérios granulométricos, mas também ensaios específicos, como o teste de não erodibilidade (No Erosion Filter – NEF), que permite avaliar diretamente o comportamento do conjunto solo-filtro sob condições de gradientes hidráulicos elevados.

2.3.3.2 Poços de alívio

Os poços de alívio são dispositivos de drenagem profunda utilizados no controle de subpressões em fundações permeáveis de barragens. Sua função principal é interceptar o fluxo ascendente da água, reduzindo os gradientes hidráulicos que, se não controlados, poderiam provocar fenômenos de surgência ou ruptura hidráulica, com risco de instabilidade da fundação e da estrutura da barragem (DAS, 2013).

De acordo com Lambe e Whitman (1969), quando a água percola por uma camada permeável confinada sob uma camada menos permeável, podem se desenvolver pressões artesianas capazes de reduzir a tensão efetiva do solo até valores críticos, favorecendo o

surgimento de erosão interna, levantamento hidráulico e eventual ruptura. Os poços de alívio atuam justamente como caminho preferencial para a dissipação dessas pressões, garantindo a estabilidade da região de jusante da barragem.

Cruz (2004) ressalta que os poços são especialmente eficazes em barragens construídas sobre fundações formadas por solos arenosos, cascalhos, aluviões ou rochas fraturadas, onde os sistemas de drenagem convencionais, podem não ser suficientes para reduzir as subpressões a níveis seguros.

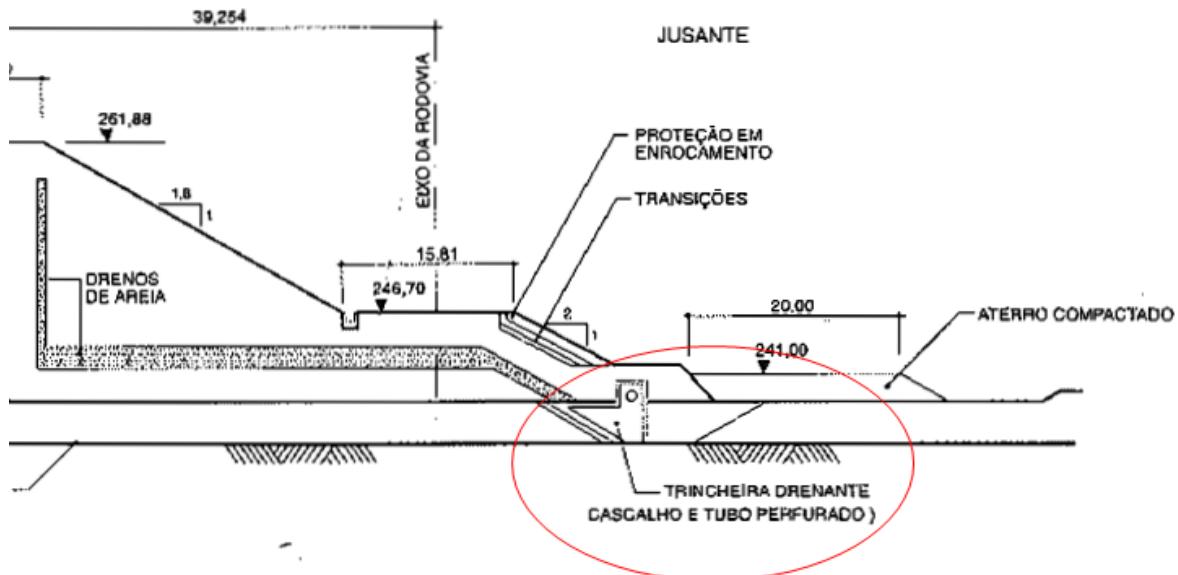
O dimensionamento dos poços de alívio deve considerar fatores como a extensão e a profundidade da camada permeável, o coeficiente de permeabilidade, o nível d'água máximo no reservatório e o carregamento hidráulico aplicado. Segundo Das (2013), o espaçamento entre poços geralmente varia entre 5 e 20 metros, e sua profundidade deve ser suficiente para atravessar totalmente a camada permeável que contribui para as subpressões. O diâmetro dos poços pode variar entre 0,5 e 1,5 metros, preenchidos com materiais drenantes, como brita ou pedregulho, e equipados, em muitos casos, com tubos perfurados que conduzem a água até drenos horizontais ou galerias de drenagem.

Divino (2010) complementa que a eficiência dos poços está diretamente relacionada à sua correta execução, especialmente no que diz respeito ao controle da segregação dos materiais drenantes e à manutenção periódica para evitar colmatação, obstruções e perda da capacidade hidráulica ao longo da vida útil da barragem.

2.3.3.3 Trincheiras drenantes

As trincheiras drenantes são dispositivos de controle de percolação frequentemente empregados em barragens de terra, com a função de interceptar fluxos subterrâneos e aliviar subpressões na fundação, especialmente na região de jusante (Figura 2.8). Trata-se, essencialmente, de uma escavação linear preenchida com material drenante, muitas vezes associada a tubos perfurados, cuja função é captar e conduzir a água para zonas seguras de descarga (DAS, 2013).

Figura 2.8 - Barragem de terra com sistema de drenagem com trincheira drenante



Fonte: Adaptado de Cruz (2004)

De acordo com Cruz (2004), essas trincheiras são particularmente efetivas quando as fundações permeáveis estão sobrepostas por camadas de baixa permeabilidade de pequena espessura. Nestes casos, a trincheira atravessa a camada menos permeável e se aprofunda ligeiramente na camada drenante subjacente, proporcionando uma via eficiente para dissipação das subpressões, mitigando riscos de levantamento hidráulico, surgência e erosão na zona de jusante.

Silva (2016) ressalta que, além de sua eficácia hidráulica, o dimensionamento geométrico das trincheiras deve observar larguras mínimas entre 0,6 e 0,8 metros e profundidades que, na prática, costumam alcançar até 3,5 metros, dependendo das condições geotécnicas da fundação. A escolha dos materiais drenantes deve garantir elevada permeabilidade e estabilidade granulométrica, de modo a impedir processos de colmatação ou arraste de finos da fundação.

Experiências documentadas em grandes obras, como as barragens de Água Vermelha, Cocorobó e Açu, reforçam a importância da avaliação cuidadosa da interação solo-trincheira. Nesses casos, a execução de trincheiras drenantes profundas exigiu o emprego de sistemas auxiliares de rebaixamento, além de cuidados especiais com a compactação dos solos adjacentes para evitar laminações e movimentos diferenciais (CARVALHO et al., 1981).

2.4 Ruptura de barragens de terra

A ruptura de barragens de terra é um evento de alto impacto, com consequências sociais, ambientais e econômicas severas. Na maioria dos casos, está associada a processos como percolação descontrolada, insuficiência de vertedouros, instabilidade de taludes ou falhas na fundação. Compreender esses mecanismos é essencial para projetos seguros, manutenção adequada e gestão eficiente dos riscos.

2.4.1 Mecanismos típicos de ruptura

Os mecanismos de ruptura em barragens de terra representam um conjunto de processos físicos que, quando não devidamente controlados, podem levar à falha estrutural total da obra. De modo geral, esses mecanismos estão associados a fatores como deficiências de projeto, construção, operação, manutenção ou, ainda, a eventos naturais extremos que excedem as condições de projeto. Nesse contexto, a compreensão dos processos físicos envolvidos é fundamental para a gestão de riscos e para o desenvolvimento de medidas preventivas eficazes (BEZERRA, 2023).

Dentre os mecanismos mais recorrentes destaca-se a erosão interna progressiva do maciço. Este fenômeno ocorre quando o gradiente hidráulico supera a resistência do solo, ocasionando a migração de partículas finas ao longo de trajetórias preferenciais, como interfaces mal executadas, zonas de contato com estruturas ou descontinuidades geológicas. A evolução do *piping* pode gerar cavidades internas que se expandem até o colapso da estrutura, sendo este um dos mecanismos mais críticos em barragens de terra (FEMA, 2015).

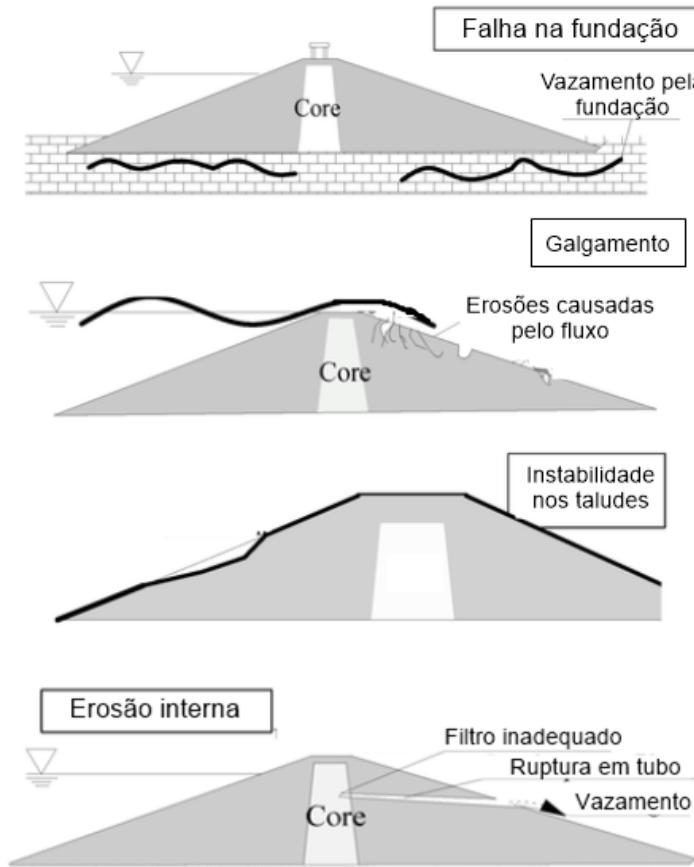
Outro mecanismo relevante é o galgamento, que ocorre quando a lâmina de água do reservatório ultrapassa a crista da barragem, provocando erosão superficial dos taludes. Este processo é geralmente associado à insuficiência do vertedouro, à obstrução de estruturas extravasadoras ou à ocorrência de eventos hidrológicos extremos que superam a capacidade de vazão projetada. O galgamento é especialmente danoso em barragens de terra, uma vez que essas estruturas não são concebidas para suportar fluxo superficial, o que leva rapidamente à formação de sulcos erosivos e à ruptura generalizada (FEMA, 2023).

As falhas de fundação também configuram um dos principais modos de ruptura em barragens. Tais falhas podem decorrer de recalques diferenciais, surgência ou desenvolvimento de trajetórias de fluxo sob a fundação, que favorecem o início de processos de erosão. Fundações constituídas por materiais solúveis, colapsíveis ou com descontinuidades estruturais

aumentam significativamente o risco de instabilidade global ou de processos erosivos internos, comprometendo a integridade da obra (FEMA, 2023).

A Figura 2.9 apresenta os principais mecanismos de ruptura em barragens de terra. Cada um desses processos está relacionado a condições específicas, como filtros inadequados, sobrecarga hidráulica, rebaixamento rápido ou deficiências construtivas, sendo fundamentais para a análise de segurança e gestão de riscos na operação de barragens.

Figura 2.9 - Modos de ruptura típicos em barragens de terra



Fonte: Adaptado de FU et al. (2018)

Além desses mecanismos, é importante considerar as falhas induzidas por fenômenos externos, como sismos, que podem provocar liquefação de materiais suscetíveis, deslocamentos estruturais e perda de resistência. Embora menos frequente, a liquefação representa um risco relevante em determinadas condições geotécnicas e sísmicas, podendo ocasionar colapsos rápidos e catastróficos das estruturas (FEMA, 2015).

Destaca-se que falhas operacionais e erros humanos também são elementos que contribuem significativamente para a materialização dos cenários de ruptura. A ausência de manutenção adequada, inspeções insuficientes ou falhas nos sistemas de monitoramento e

alarme podem impedir a detecção precoce de sinais de deterioração, favorecendo a evolução dos modos de falha até o colapso da estrutura (BEZERRA, 2023).

2.4.2 Casos históricos

Segundo Hartford e Baecher (2004), o risco de falha de barragens, apesar de estatisticamente baixo, exige atenção contínua, pois seus impactos envolvem perda de vidas humanas, destruição de comunidades e danos ambientais irreversíveis.

No Brasil, os rompimentos das barragens de Camará, em 2004, e Algodões I, em 2009, reforçam a importância de sistemas de manutenção adequados e de projetos que considerem, de forma robusta, os aspectos hidráulicos e geotécnicos. Ambos os eventos foram amplamente analisados em relatórios da Agência Nacional de Águas (LIMA, 2004; COSTA, 2010).

A Tabela 2.1 sintetiza alguns casos históricos de ruptura de barragens construídas para reserva de água, abrangendo diferentes países e contextos, com destaque para o tipo de barragem, o mecanismo predominante de ruptura e as principais consequências associadas a cada evento.

Tabela 2.1 - Casos históricos de ruptura de barragens para acumulação de água

Barragem	Ano	Localização	Tipo de Barragem	Mecanismo de Ruptura	Principais Consequências
South Fork (Johnstown)	1889	EUA	Terra	Galgamento	2.209 mortos e destruição urbana extensa
St. Francis	1928	EUA	Concreto e solo	Instabilidade de fundação	431 mortos e danos severos a jusante
Vajont	1963	Itália	Concreto (deslizamento externo)	Onda gerada por deslizamento	≈2.000 mortos por transbordamento súbito
Banqiao e Shimantan	1975	China	Terra e núcleo de argila	Galgamento múltiplo	>26.000 mortos e milhões de desabrigados
Machchhu II	1979	Índia	Terra	Galgamento	Entre 1.800 e 5.000 mortos
Camará	2004	Paraíba – Brasil	CCR (concreto compactado)	Deficiência de drenagem / erosão interna	4 mortos e centenas de desabrigados
Algodões I	2009	Piauí – Brasil	Terra	Falha no vertedouro / erosão interna	9 mortos e destruição de comunidades
Itabirito	2014	Minas Gerais – Brasil	Terra (dique de água)	Percolação / drenagem insuficiente	Danos materiais e evacuação preventiva
Machadinho d'Oeste	2019	Rondônia – Brasil	Terra	Percolação / erosão	Danos locais sem vítimas

Fonte: LIMA (2004), COSTA (2010), FU et al. (2018), FEMA (2015; 2023), ASDSO (2022), Foster, Fell e Spannagle (2000), Hartford e Baecher (2004)

De acordo com FU et al. (2018), a ocorrência de falhas não está restrita a grandes barragens ou a países com maior densidade de estruturas. Barragens de pequeno e médio porte, muitas vezes sem supervisão técnica contínua, também estão sujeitas aos mesmos mecanismos de ruptura, especialmente em contextos de chuvas intensas e ausência de vertedouros adequados.

2.5 Instrumentação de barragens

A instrumentação em barragens representa uma ferramenta fundamental para o monitoramento do comportamento estrutural e geotécnico dessas obras ao longo de sua vida útil. Por meio da observação contínua de variáveis como poropressões, deslocamentos, recalques, tensões internas e vazões de drenagem, torna-se possível avaliar se o comportamento da estrutura está em conformidade com as premissas adotadas em projeto. Segundo Fonseca (2003), a instrumentação constitui parte integrante do projeto de barragens, sendo essencial desde as fases de construção, enchimento e operação, visando garantir a verificação do desempenho e a confirmação das hipóteses adotadas.

De acordo com Silveira (2006), a elaboração de um programa de instrumentação exige uma abordagem criteriosa, que inclui a definição dos parâmetros a serem monitorados, a seleção dos instrumentos mais adequados, bem como sua correta distribuição no maciço e fundação.

Conforme destaca Dunncliff (1993), a instrumentação deve ser concebida como uma ferramenta de engenharia capaz de transformar incertezas em informações quantitativas, permitindo avaliar o desempenho das obras geotécnicas. O autor enfatiza que o uso adequado da instrumentação pressupõe um planejamento rigoroso, no qual cada instrumento deve ser instalado com um propósito bem definido, de modo a responder a perguntas específicas sobre o comportamento da barragem, especialmente no que se refere às pressões intersticiais, deslocamentos e estabilidade geral da estrutura.

Segundo Santos (2019), a importância da instrumentação em barragens tem se tornado cada vez mais evidente, especialmente após os recentes rompimentos de grandes estruturas no Brasil. Um sistema de instrumentação eficiente é indispensável para o acompanhamento da evolução do comportamento da estrutura, contribuindo diretamente para a identificação de potenciais anomalias e para a adoção de medidas preventivas e corretivas de forma tempestiva.

A instrumentação de barragens envolve a utilização de diferentes dispositivos destinados ao monitoramento das condições de estabilidade e segurança da estrutura. Entre os principais instrumentos estão os piezômetros, medidores de nível d'água, medidores de vazão,

medidores de recalque, marcos superficiais e inclinômetros. Cada um deles possui função específica, permitindo o acompanhamento de variáveis como poropressões, níveis d'água, vazões de drenagem e deslocamentos, que são essenciais para a avaliação do comportamento do maciço e da fundação ao longo do tempo.

2.5.1 Piezômetros

Os piezômetros desempenham um papel central no monitoramento do regime hidráulico de barragens de terra, sendo utilizados para a medição das pressões neutras no interior do maciço e da fundação. A determinação da poropressão é de fundamental importância, pois está diretamente associada à estabilidade da estrutura. A redução da tensão efetiva provocada pelo aumento da poropressão pode resultar na diminuição do fator de segurança e no desenvolvimento de mecanismos de ruptura, especialmente em condições críticas, como carregamento externo, saturação excessiva ou rebaixamento rápido do nível do reservatório (SILVEIRA, 2006).

Conforme discutido por Dunncliff (1993), existem diferentes tipos de piezômetros, sendo a seleção dependente das características geotécnicas do local, da velocidade de resposta necessária e dos objetivos do monitoramento. O piezômetro de tubo aberto (*standpipe*) é indicado para solos de alta permeabilidade e para medições de longo prazo, apresentando, contudo, baixa capacidade de resposta em solos de baixa permeabilidade ou em eventos de variação rápida do nível d'água. Já os piezômetros hidráulicos e pneumáticos apresentam tempos de resposta mais rápidos, sendo mais adequados para solos de baixa permeabilidade ou onde haja necessidade de detecção de variações rápidas nas pressões neutras. Os piezômetros de corda vibrante, por sua vez, são amplamente utilizados em projetos modernos devido à sua elevada precisão, confiabilidade, baixo custo de manutenção e facilidade de automação das leituras.

Além da seleção do tipo de instrumento, a correta locação dos piezômetros é fator determinante para a eficácia do monitoramento. Segundo Santos (2019), esses instrumentos devem ser instalados preferencialmente nas seções críticas da barragem, como na linha de centro do núcleo impermeável, nas interfaces entre materiais com diferentes permeabilidades, na região de jusante para controle da eficiência dos filtros e drenos, e nas fundações, particularmente em zonas com evidências de maior fluxo ou fragilidade geotécnica. A escolha da profundidade de instalação também deve considerar a posição da superfície freática esperada e dos gradientes hidráulicos máximos.

A análise dos registros piezométricos permite avaliar a eficiência dos dispositivos de vedação e drenagem, bem como identificar alterações no regime de fluxo. Desvios em relação ao comportamento previsto, como elevações anormais das poropressões ou aumento progressivo dos níveis medidos, podem indicar processos evolutivos de obstrução dos sistemas de drenagem, surgimento de trajetórias preferenciais de percolação, presença de erosão interna (*piping*) ou até falhas construtivas (SILVEIRA, 2006).

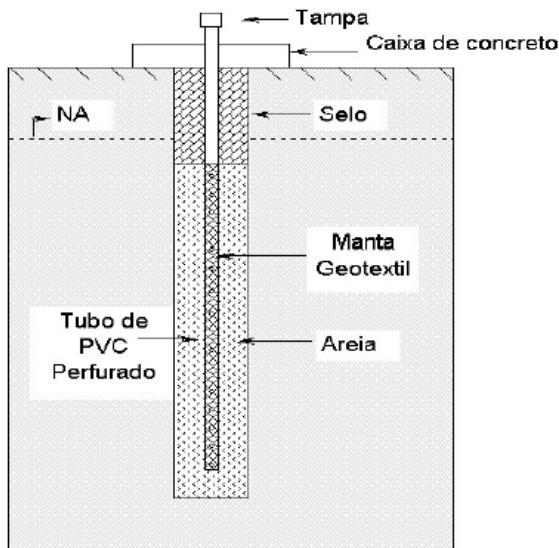
A interpretação dos dados piezométricos deve ser realizada de forma integrada, considerando também as leituras dos demais instrumentos, como medidores de vazão, inclinômetros e marcos superficiais. Essa análise conjunta permite compreender com maior precisão a evolução dos processos de percolação e sua influência sobre a estabilidade global da estrutura. Como destacado por Dunncliff (1993), leituras isoladas podem conduzir a interpretações equivocadas, sendo imprescindível a correlação dos dados com as condições hidrológicas, operacionais e geotécnicas da barragem.

2.5.2 *Medidores de nível d'água*

Os medidores de nível d'água são instrumentos fundamentais no monitoramento hidráulico de barragens, utilizados para acompanhar as variações dos níveis de pontos internos do maciço ou da fundação. O controle dos níveis d'água é essencial, uma vez que esses valores estão diretamente associados aos carregamentos hidráulicos aplicados sobre o maciço, impactando significativamente o regime de percolação e, consequentemente, a estabilidade da estrutura (SILVEIRA, 2006).

A Figura 2.10 apresenta o esquema de instalação de um medidor de nível d'água, composto por um tubo de PVC perfurado, envolto por material filtrante (areia) e geotêxtil, que impede a entrada de partículas finas. O nível d'água interno no tubo se estabiliza conforme o nível freático do meio, permitindo o monitoramento de suas variações ao longo do tempo (FONSECA, 2003).

Figura 2.10 – Esquema de instalação de um medidor de nível d’água.



Fonte: Fonseca (2003)

De acordo com Dunnicliff (1993), o monitoramento dos níveis d’água é uma das medições mais básicas, porém indispensáveis, em programas de instrumentação. Esse controle permite, a avaliação do comportamento hidráulico da estrutura em diferentes condições, como enchimento, rebaixamento ou eventos extremos, contribuindo diretamente para a análise da segurança da barragem.

A seleção do tipo adequado depende de fatores como a necessidade de monitoramento contínuo, a profundidade do local, as condições ambientais e a integração com sistemas de aquisição de dados (CERQUEIRA, 2017).

Conforme discutido por Clarkson (2020), a tendência atual é a utilização de medidores de nível integrados a sistemas de monitoramento em tempo real, especialmente em estruturas críticas. Esse avanço tecnológico permite a transmissão de dados de forma contínua e remota, facilitando o acompanhamento das condições operacionais da barragem e permitindo respostas rápidas em situações de risco.

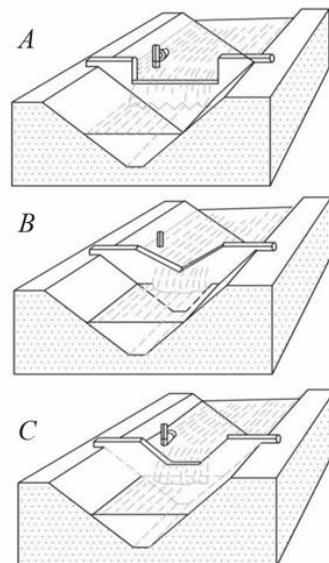
O monitoramento adequado dos níveis d’água também é essencial para a interpretação dos dados piezométricos e de vazão. A correlação entre as flutuações do nível freático e as variações das poropressões permite validar o comportamento hidráulico previsto em projeto, além de auxiliar na detecção de eventuais anomalias no sistema, como obstruções de drenos ou surgimento de trajetórias preferenciais de percolação (SILVEIRA, 2006).

2.5.3 *Medidores de vazão*

O monitoramento das vazões drenadas em barragens é essencial para avaliar o comportamento do sistema de drenagem e detectar eventuais anomalias, como obstruções ou desenvolvimento de processos erosivos internos. Segundo Dunningcliff (1993), o controle das vazões permite identificar alterações nos regimes de percolação que, quando interpretadas corretamente, são fundamentais para a manutenção da segurança da estrutura ao longo de sua vida útil.

Conforme apresentado por Silveira (2006), os dispositivos mais utilizados para essa finalidade são os vertedores e calhas hidráulicas, que operam com escoamento em canal aberto. Entre os principais tipos destacam-se os vertedores retangulares, triangulares e trapezoidais (Figura 2.11). A seleção do tipo adequado depende diretamente da faixa de vazão esperada e das condições locais de instalação.

Figura 2.11 – Tipos de medidores de vazão



Fonte: Barreto (2023)

Os vertedores triangulares são amplamente empregados para a medição de pequenas vazões, devido à sua alta sensibilidade às variações de nível. Esses dispositivos são particularmente úteis na fase inicial de operação da barragem, quando as vazões de drenagem tendem a ser mais reduzidas. Contudo, quando as vazões ultrapassam limites próximos a 600 litros por minuto, torna-se necessário recorrer a outros dispositivos de maior capacidade (AFFONSO, 2004).

O vertedor trapezoidal, é recomendado para situações de vazões intermediárias. Ele apresenta uma boa relação entre simplicidade construtiva e precisão nas medições. A sua aplicação é comum em sistemas de drenagem de barragens que operam com vazões na faixa de centenas até dezenas de milhares de litros por minuto (BARRETO, 2023).

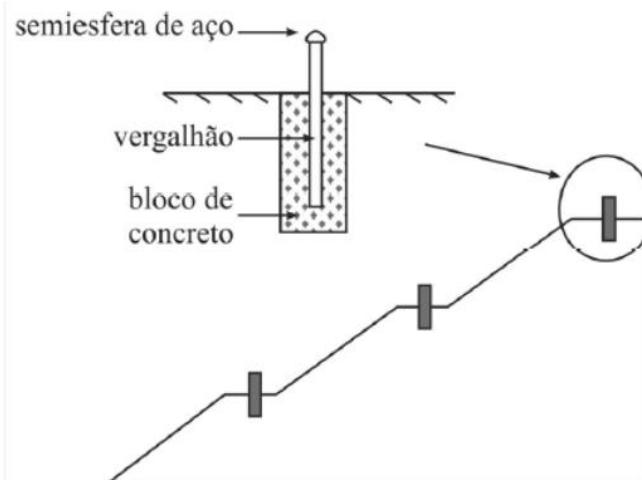
Por sua vez, o vertedor retangular, que consiste em uma soleira horizontal de dimensões definidas, é mais utilizado para grandes vazões. Esse tipo de dispositivo é especialmente indicado para drenagens de maior escala, como observado em barragens de grande porte, devido à robustez e à facilidade de instalação e manutenção (BARRETO, 2023).

Atualmente, observa-se uma tendência crescente de automação dos sistemas de medição de vazão, incorporando sensores de nível, transdutores de pressão e sistemas de aquisição de dados em tempo real. Essa evolução tecnológica permite um monitoramento mais preciso e contínuo, essencial para a detecção precoce de alterações no comportamento hidráulico da barragem (SILVEIRA, 2006).

2.5.4 Marcos superficiais

Os marcos superficiais são instrumentos fundamentais no monitoramento geotécnico de barragens, especialmente no controle de deslocamentos horizontais e verticais ao longo do tempo. Esses dispositivos consistem, geralmente, em elementos metálicos fixados em blocos de concreto, rigidamente ancorados na superfície do maciço, de forma a representar o comportamento global da estrutura (Figura 2.12) (FONSECA, 2003).

Figura 2.12 – Esquema de instalação de marco superficial



Fonte: Fonseca (2003)

As leituras são realizadas por meio de levantamentos topográficos, utilizando Estações Totais ou Níveis Geodésicos, com base em uma rede de referências externas, previamente definidas em locais considerados estáveis, fora da zona de influência da barragem (FONSECA, 2003).

De acordo com Smiderle (2014), os dados obtidos por meio dos marcos superficiais permitem a quantificação precisa dos deslocamentos acumulados na superfície da estrutura, sendo particularmente úteis para o monitoramento de recalques verticais e deslocamentos horizontais associados a processos de deformação lenta, como adensamento, recalque diferencial, deformações térmicas sazonais e, em casos mais severos, processos evolutivos de instabilidade.

Nas últimas décadas, os sistemas convencionais de monitoramento por marcos superficiais vêm sendo complementados por tecnologias de sensoriamento remoto, como a Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR) e as Estações Totais Robóticas (ETR). Conforme apresentado por Lima et al. (2023), o monitoramento integrado utilizando InSAR e ETR tem demonstrado elevada eficácia na detecção de deslocamentos superficiais em barragens, oferecendo uma visão ampla da distribuição espacial dos deslocamentos, aliada à precisão dos dados obtidos em pontos específicos.

Além disso, Lima et al. (2023) ressaltam que o uso combinado dessas tecnologias permite uma melhor compreensão dos padrões de deformação, possibilitando a identificação de tendências evolutivas, movimentos localizados e comportamento diferencial entre diferentes setores do maciço. Esta abordagem integrada não apenas aumenta a confiabilidade dos dados, como também otimiza a gestão da segurança da estrutura, uma vez que possibilita a tomada de decisão baseada em informações precisas e atualizadas.

Complementarmente, Silveira (2006) reforça que os marcos superficiais são particularmente importantes no monitoramento de longo prazo de barragens, permitindo o acompanhamento de deslocamentos associados a processos de recalque progressivo, deformações térmicas sazonais, variações nas condições hidrológicas e até acomodações estruturais do maciço e da fundação.

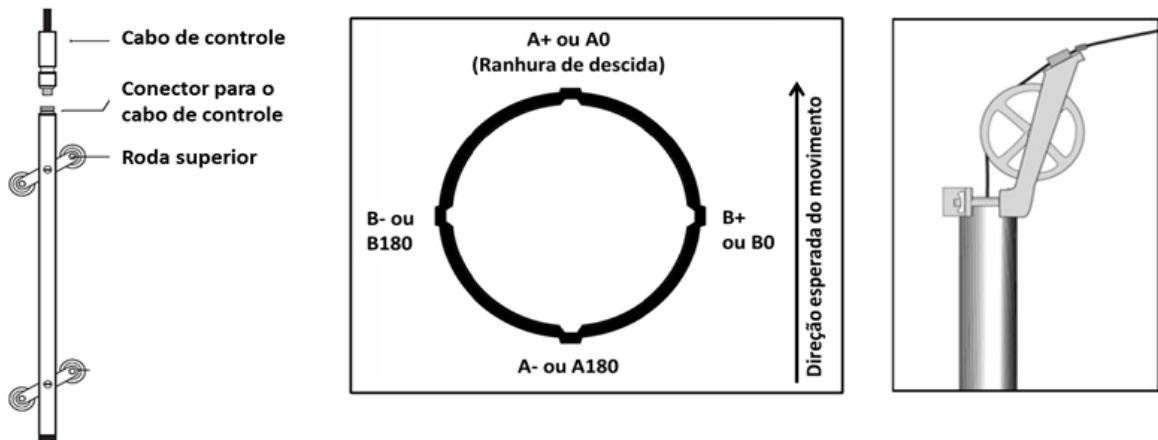
2.5.5 *Inclinômetros*

Os inclinômetros são instrumentos amplamente empregados no monitoramento geotécnico de barragens, sendo utilizados na detecção e acompanhamento de deslocamentos horizontais em profundidade. Sua aplicação é indispensável para avaliar a mobilização de

esforços internos no maciço, identificar superfícies potenciais de ruptura e acompanhar a evolução de movimentos diferenciais ao longo do tempo (DUNNICLIFF, 1993).

O princípio de funcionamento do inclinômetro baseia-se na medição das inclinações de uma sonda, que se desloca ao longo de um tubo guia previamente instalado no interior do maciço ou fundação da barragem. Este tubo, dotado de calhas ortogonais, define dois planos principais de medição, possibilitando o registro dos deslocamentos incrementais ao longo da profundidade (Figura 2.13). A partir desses dados, são calculados os deslocamentos acumulados, permitindo traçar perfis de deformação e identificar zonas críticas de movimento (COIMBRA, 2019).

Figura 2.13 - Detalhes da sonda do inclinômetro, seção do tubo guia ranhurado e direção das leituras.



Fonte: Branco et al. (2023).

De acordo com Carim et al. (2019), a precisão das medições está diretamente relacionada à correta instalação do tubo guia, ao alinhamento rigoroso das calhas de medição e à adoção de boas práticas operacionais durante as leituras. Falhas na instalação, como deflexões do tubo, falta de verticalidade ou acúmulo de sedimentos no interior, comprometem significativamente a qualidade dos dados. Além disso, destaca-se a necessidade de procedimentos de controle de qualidade, como a realização de leituras diretas e reversas, que permitem minimizar erros associados à instrumentação e ao operador.

O desenvolvimento tecnológico tem permitido a evolução dos sistemas de medição de deslocamento horizontal, especialmente com a introdução dos inclinômetros automatizados de leitura contínua. Esses dispositivos são compostos por sensores distribuídos ao longo do tubo guia, possibilitando o monitoramento em tempo real dos deslocamentos (CARIM, 2019).

2.6 Modelagem numérica em barragens

2.6.1 Princípios da análise de fluxo

A análise de fluxo em meios porosos saturados e não saturados é governada fundamentalmente pela Lei de Darcy, estabelecida em 1856, que expressa a relação entre a velocidade de descarga, o gradiente hidráulico e a condutividade hidráulica do meio, conforme definido no Item 2.2. Em sistemas mais complexos, como barragens com fundações heterogêneas ou geometrias irregulares, a distribuição do fluxo é regida pela equação diferencial de Laplace para regime permanente. Para fluxo não confinado ou quando há variação no tempo (análise transiente), inclui-se o termo de armazenamento:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ii} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \pm q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

k_{ii} são os componentes do tensor de permeabilidade [L/T];

h é a carga hidráulica [L];

S_s é o coeficiente de armazenamento específico [1/L];

q_s representa fontes ou sumidouros externos [T^{-1}].

No caso específico de análises bidimensionais em seção transversal, frequentemente aplicadas em estudos preliminares de barragens, Casagrande (1937) propôs uma formulação simplificada para a estimativa da linha freática e da vazão de percolação (Figura 2.14):

$$q = k \cdot \alpha \cdot \sin^2 \beta \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

α é o comprimento da superfície de percolação (m);

β é o ângulo do talude de jusante.

O comprimento da linha de percolação é determinado por:

$$\alpha = S - \sqrt{S^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \beta}} \quad \text{Equação 7}$$

$$S = \sqrt{d^2 + h^2} \quad \text{Equação 8}$$

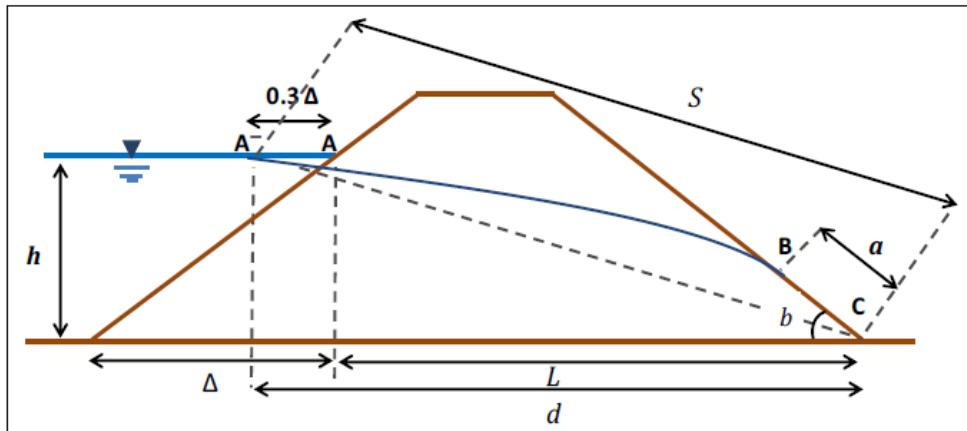
$$d = L + 0,3\Delta \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

L é o comprimento da base da barragem;

h é a lâmina d'água no reservatório.

Figura 2.14 - Representação esquemática da linha freática e dos parâmetros geométricos na solução de Casagrande para análise de fluxo em barragens de terra.



Fonte: Adaptado de Al-Janabi et al. (2024)

Atualmente, existem diversos *softwares* comerciais e acadêmicos que permitem realizar análises de fluxo em meios porosos aplicados a barragens. Entre os mais utilizados na engenharia geotécnica está o *SEEP/W*, desenvolvido pela *Geo-Slope International*, que se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF) e permite a modelagem tanto de fluxo permanente quanto transitório, considerando condições saturadas e não saturadas, além de permitir a definição de anisotropia hidráulica dos materiais. Este software é amplamente utilizado em projetos de barragens devido à sua interface intuitiva, flexibilidade na definição de geometrias complexas e possibilidade de integração direta com módulos de estabilidade, como o *SLOPE/W* (GEO-SLOPE, 2015).

Outro *software* de grande utilização é o *MODFLOW*, desenvolvido originalmente pelo *U.S. Geological Survey (USGS)*. Este programa utiliza o Método das Diferenças Finitas (MDF) e é amplamente empregado em estudos hidrogeológicos, particularmente para simulações de fluxo subterrâneo em grandes domínios, como aquíferos e fundações de barragens (HUSSIEN et al., 2020). Embora seja extremamente robusto para simulações tridimensionais, o *MODFLOW* possui limitações quanto à representação de geometrias complexas típicas de barragens, quando comparado aos *softwares* baseados no MEF.

O *PLAXIS 2D/3D*, embora seja tradicionalmente utilizado para análises de deformações e estabilidade, também possui módulos dedicados à análise de fluxo em regime saturado e não saturado. O grande diferencial desse *software* é permitir o acoplamento direto entre as análises hidráulicas e as análises geotécnicas de deformações e tensões, o que é extremamente relevante

para avaliações mais realistas do desempenho de barragens de terra (AL-MANSORI et al., 2020).

Adicionalmente, existem ferramentas como o SEEP2D, que também é baseado no Método dos Elementos Finitos, sendo utilizado principalmente em análises bidimensionais de fluxo em barragens e fundações. Este *software*, embora mais limitado em termos de recursos gráficos e integração com outros módulos, tem sido amplamente empregado em estudos acadêmicos e projetos específicos de menor porte (HUSSIEN et al., 2020).

Além desses, *softwares* como o FLAC3D, que utiliza o Método dos Diferenciais Finitos, permitem modelagens mais avançadas de fluxo acoplado com deformações, sendo bastante utilizados em análises tridimensionais de barragens, especialmente em casos onde há interação significativa entre os regimes de fluxo e os estados de tensão-deformação do maciço (AL-MANSORI et al., 2020).

A formulação numérica exige a definição de condições de contorno, que incluem superfícies impermeáveis, nas quais o fluxo normal é nulo, superfícies com carga hidráulica prescrita, que representam, por exemplo, o nível do reservatório ou de jusante, e, ainda, condições associadas a drenos ou filtros, onde a vazão depende da diferença entre a carga hidráulica local e a carga imposta no elemento de drenagem (GEO-SLOPE, 2015).

Nos métodos numéricos amplamente empregados na engenharia geotécnica, como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Diferenças Finitas (MDF), a equação diferencial é discretizada em um sistema de equações algébricas. No caso do MEF, utilizado pelo *software* SEEP/W, o domínio é subdividido em elementos finitos, e a equação governante é convertida em sua forma integral, ponderada por funções de forma associadas aos nós dos elementos. Essa abordagem resulta na formação de um sistema matricial da forma $[K] \cdot [H] = [F]$, em que $[K]$ é a matriz de permeabilidade, $[H]$ é o vetor de cargas hidráulicas e $[F]$ é o vetor dos fluxos, que inclui os efeitos das condições de contorno e das fontes (GEO-SLOPE, 2015).

Por sua vez, o MDF, adotado em *softwares* como o MODFLOW, discretiza o domínio em uma malha estruturada de células retangulares ou cúbicas. As derivadas espaciais são aproximadas por diferenças finitas centradas, permitindo a construção de um sistema algébrico cuja resolução fornece as cargas hidráulicas em cada célula do domínio. Esse método é amplamente utilizado em modelagens hidrogeológicas de larga escala, especialmente em fundações de barragens com extensão significativa (AL-JANABI et al., 2024).

A anisotropia hidráulica dos materiais é tratada nesses modelos por meio da definição de tensores de permeabilidade, que permitem representar situações em que o fluxo horizontal é favorecido em relação ao fluxo vertical, uma condição típica em barragens construídas com

materiais compactados em camadas. Esse comportamento é incorporado por meio da definição de diferentes valores de permeabilidade nas direções horizontal e vertical, conforme o tensor de permeabilidade definido para cada material (AL-JANABI et al., 2020).

Estudos recentes, como os de Al-Janabi et al. (2024) e Hussien et al. (2020), demonstram que a variação da razão entre a permeabilidade horizontal e vertical (k_x/k_y) exerce influência significativa tanto na quantidade de vazão percolada quanto na distribuição dos gradientes hidráulicos, especialmente na região de jusante. Incrementos nessa razão conduzem a maiores vazões e à elevação da linha freática, o que, consequentemente, pode aumentar os riscos associados a processos de erosão interna.

2.6.2 *Estabilidade de taludes por equilíbrio limite*

A análise de estabilidade de taludes por métodos de equilíbrio limite é uma das abordagens mais utilizadas no projeto e na avaliação da segurança de barragens de terra. Este método fundamenta-se no princípio de que a condição de ruptura ocorre quando a resistência ao cisalhamento do solo é igual aos esforços mobilizados, sendo representada pelo fator de segurança (FS), definido como a razão entre a resistência disponível e a demanda de cisalhamento atuante no potencial mecanismo de ruptura (SEQUENT, 2023).

O conceito central do método de equilíbrio limite é discretizar a massa instável em fatias ou colunas, avaliando-se as forças de cisalhamento e normais na base e nas faces laterais de cada coluna. Diversas formulações foram desenvolvidas ao longo do tempo, desde métodos simplificados, como Fellenius (1936) e Bishop Simplificado (1955), até métodos rigorosos, como Spencer (1967) e Morgenstern-Price (1965). Estes últimos satisfazem simultaneamente as equações de equilíbrio de forças e momentos, proporcionando resultados mais precisos, especialmente em geometrias complexas ou condições hidráulicas adversas (SEQUENT, 2023).

O fator de segurança no método de equilíbrio limite é obtido a partir da expressão geral apresentada na Equação 10.

$$FS = \frac{\text{Resistência ao cisalhamento disponível}}{\text{Esforços de cisalhamento mobilizados}} \quad \text{Equação 10}$$

Para solos saturados, aplica-se a equação de resistência ao cisalhamento efetiva de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan \varphi' \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

- c' é a coesão efetiva;
- σ_n é a tensão normal total;
- u é a pressão neutra;
- φ' é o ângulo de atrito interno efetivo.

Quando há presença de solos não saturados, a equação se amplia para incluir a contribuição da sucção matricial, utilizando a formulação proposta por Fredlund e Morgenstern (1977) (SEQUENT, 2023):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi^b \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

- τ = resistência ao cisalhamento (kPa);
- c' = coesão efetiva (kPa);
- σ = tensão total normal sobre o plano de ruptura (kPa);
- u_a = pressão do ar (kPa);
- u_w = pressão da água nos poros (kPa);
- $(\sigma - u_a)$ = tensão efetiva com referência à pressão do ar (kPa);
- $(u_a - u_w)$ = sucção matricial (kPa);
- φ' = ângulo de atrito efetivo (graus);
- φ^b = parâmetro que representa a taxa de aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da sucção matricial (graus ou adimensional dependendo da abordagem).

Cada método de equilíbrio limite adota diferentes hipóteses sobre as forças entre fatias. O método de Bishop Simplificado, por exemplo, considera as forças normais entre as colunas, mas despreza as forças de cisalhamento, resolvendo apenas o equilíbrio de momentos. Por outro lado, os métodos de Spencer e Morgenstern-Price consideram tanto forças normais quanto de cisalhamento, atendendo às equações de equilíbrio de forças horizontais e verticais, além do momento, o que resulta em uma formulação mais robusta e adequada para condições geotécnicas complexas (SEQUENT, 2023).

No contexto de barragens, a análise de estabilidade dos taludes deve considerar, de forma acoplada, os efeitos da pressão neutra proveniente do fluxo de percolação. A integração dos resultados de modelos de fluxo, como os obtidos no SEEP/W ou MODFLOW, é fundamental para a definição das condições de carregamento hidráulico ao longo das superfícies de ruptura potenciais. Estudos como os de Lopes et al. (2024) destacam que variações na linha freática e no regime de percolação influenciam diretamente os fatores de segurança,

especialmente em situações de rebaixamento rápido ou falhas nos sistemas de drenagem (LOPES et al., 2024).

O estudo desenvolvido por Salman et al. (2024), aplicado à barragem Hub, destaca que o comportamento do talude de montante sob condição de rebaixamento rápido é particularmente crítico, pois a retirada súbita da lâmina d'água elimina o efeito estabilizador da pressão externa, sem permitir a dissipação imediata da poropressão interna.

Esse desequilíbrio gera uma redução significativa nos fatores de segurança, que caem de 2,122 no estado permanente para 2,023 no cenário de rebaixamento rápido, evidenciando uma situação limite que, embora não configure falha imediata, aproxima-se dos critérios de instabilidade adotados para projetos geotécnicos.

A pesquisa conduzida por Athani et al. (2015) apresenta uma abordagem ainda mais detalhada do ponto de vista matemático e paramétrico, utilizando o método dos elementos finitos no *software* PLAXIS 3D para analisar não apenas os efeitos da percolação sobre a estabilidade, mas também a influência direta dos parâmetros de deformabilidade dos materiais. Os resultados mostraram que, para condições de reservatório cheio e nível baixo, os fatores de segurança permaneceram acima de 1,6, configurando situações seguras.

Contudo, nos cenários de rebaixamento rápido, os valores de FS foram reduzidos para níveis próximos ou abaixo do critério mínimo, especialmente na condição de rebaixamento em cinco dias, onde a dissipação de poropressões foi insuficiente.

2.6.3 *Integração entre simulações hidráulicas e mecânicas*

A integração entre simulações hidráulicas e mecânicas permite que as pressões neutras provenientes da análise de fluxo sejam diretamente incorporadas no cálculo das tensões efetivas, fundamentais para a determinação do fator de segurança (FS) dos taludes.

A utilização de modelos acoplados permite que as análises de estabilidade considerem, de forma realista, as poropressões obtidas nas simulações de fluxo. Esse procedimento é indispensável para representar adequadamente as condições de carregamento hidráulico, tanto em regimes permanentes quanto transientes, como reforça Zhang et al. (2020).

Esse acoplamento é particularmente relevante em cenários de rebaixamento rápido. Nessas condições, a retirada da lâmina d'água não é acompanhada pela dissipação imediata da poropressão no interior do maciço. Estudos como os de Salman et al. (2024) e Athani et al. (2015) demonstram que essa discrepância resulta na redução significativa dos fatores de segurança, elevando o risco de instabilidade no talude de montante.

Além disso, a análise de solos não saturados também é aprimorada por essa integração. Por meio da formulação de Fredlund e Morgenstern (1977), implementada em *softwares* como o SLOPE/W (SEQUENT, 2023), torna-se possível incluir o efeito da sucção matricial nas zonas não saturadas do maciço, aumentando a precisão da avaliação da resistência ao cisalhamento.

2.7 Critérios de projeto e normas técnicas

2.7.1 Normas brasileiras

O desenvolvimento das normas brasileiras aplicáveis às barragens reflete um processo contínuo de aprimoramento técnico, motivado tanto pela evolução da engenharia quanto pela necessidade de aprimorar a gestão de riscos associados a essas estruturas. Historicamente, as primeiras iniciativas normativas surgiram a partir de demandas específicas de setores industriais, especialmente mineração, energia e recursos hídricos.

O primeiro marco relevante no contexto normativo brasileiro foi a publicação da norma ABNT NBR 13028:1993, que estabeleceu requisitos técnicos mínimos para o projeto, construção e operação de barragens de contenção de rejeitos de mineração. Embora pioneira, essa norma apresentava limitações em relação aos critérios de estabilidade, monitoramento e controle de segurança, demandando subsequentes revisões e aprimoramentos (ABNT, 1993).

Em 2006, foi publicada uma revisão significativa da norma, a ABNT NBR 13028:2006, que introduziu parâmetros mais robustos para análise de estabilidade, diretrizes para sistemas de drenagem, controle de percolação, operação segura e critérios mínimos de fator de segurança (ABNT, 2006). Posteriormente, em 2017, essa norma foi novamente atualizada, incorporando exigências mais rigorosas relacionadas à segurança, fiscalização, operação e gestão de risco, especialmente à luz dos desastres registrados no país (ABNT, 2017).

No caso das barragens destinadas à acumulação de água, as normas aplicáveis são mais generalistas. Destacam-se a NBR 8681:2003, que trata da definição das ações que devem ser consideradas no projeto estrutural, incluindo cargas permanentes e acidentais, a NBR 11682:2009, que aborda os critérios para estabilidade de taludes, sendo diretamente aplicável a barragens de terra e enrocamento, a NBR 6122:2019, que estabelece diretrizes para projeto e execução de fundações, fundamental para obras hidráulicas e a NBR 7187:2003, que trata dos procedimentos para projetos de estruturas de concreto, aplicável a barragens de gravidade, contrafortes e outros tipos (ABNT, 2003; ABNT, 2009; ABNT, 2019).

No ano de 2010, ocorreu a promulgação da Lei nº 12.334, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Esta legislação representou um marco normativo ao estabelecer diretrizes abrangentes para segurança de barragens, aplicando-se às estruturas destinadas à acumulação de água, disposição de rejeitos e resíduos industriais.

A lei definiu princípios e responsabilidades, obrigando os empreendedores à elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB), à realização de Inspeções de Segurança Regulares (ISR) e Revisões Periódicas de Segurança de Barragens (RPSB), além da elaboração e manutenção atualizada do Plano de Ação de Emergência (PAE) para os casos em que o dano potencial associado à estrutura é considerado médio ou alto (BRASIL, 2010).

A partir da instituição da PNSB, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), como órgão responsável pela fiscalização das barragens de usos múltiplos dos recursos hídricos, passou a desempenhar papel relevante na regulamentação e detalhamento dos procedimentos operacionais.

Com esse objetivo, foram publicadas importantes resoluções que complementam a Lei nº 12.334/2010 e oferecem suporte técnico tanto aos empreendedores quanto aos órgãos fiscalizadores, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Evolução cronológica das resoluções da ANA sobre segurança de barragens

Ano	Resolução	Descrição
2017	Resolução nº 236	Estabelece os critérios e procedimentos para elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE). Define parâmetros para delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) e procedimentos de alerta e comunicação.
2019	Resolução nº 1.219	Define as diretrizes e conteúdos mínimos obrigatórios para a elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB), incluindo sua estruturação e atualização periódica.
2020	Resolução nº 51	Dispõe sobre os procedimentos para apresentação da Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), documento essencial para a certificação da estabilidade da barragem.
2021	Resolução nº 149	Estabelece os critérios e procedimentos para elaboração dos Relatórios de Inspeção de Segurança Regular (ISR) e das Revisões Periódicas de Segurança de Barragens (RPSB), incluindo conteúdo mínimo, periodicidade e formato.

Fonte: Adaptado de ANA (2017, 2019, 2020, 2021)

Além das resoluções, a ANA, com o apoio de organismos internacionais, como o Banco Mundial e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), elaborou uma série de manuais técnicos que servem como referência prática para empreendedores e órgãos fiscalizadores. Esses manuais abrangem desde a elaboração dos Planos de Segurança de Barragens até diretrizes para a realização de inspeções regulares, revisões periódicas e formulação dos Planos de Ação de Emergência (ANA, 2014).

O fortalecimento do arcabouço normativo brasileiro também foi impulsionado, de forma significativa, pelos acidentes ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que trouxeram à tona fragilidades na gestão da segurança de barragens. Esses eventos catalisaram aprimoramentos legislativos, técnicos e operacionais, levando a uma revisão de práticas, ampliação das exigências de monitoramento, aumento da responsabilidade dos empreendedores e aperfeiçoamento dos mecanismos de fiscalização.

2.7.2 *Diretrizes internacionais*

A fundação da International Commission on Large Dams (ICOLD), em 1928, em Paris, representa o principal marco institucional no cenário internacional. A ICOLD surgiu com o

propósito de promover o intercâmbio de conhecimentos técnicos entre engenheiros e instituições de diferentes países, estabelecendo diretrizes que contemplam o ciclo completo de vida das barragens, desde a concepção até a operação e eventual descomissionamento (ICOLD, 2018).

Inicialmente, as diretrizes da ICOLD eram voltadas majoritariamente para aspectos de projeto e construção, priorizando parâmetros estruturais, hidráulicos e geotécnicos. Essas recomendações abrangem critérios como a seleção de materiais, estabilidade de taludes, controle de percolação, dimensionamento de vertedouros, critérios para fundações e para estruturas auxiliares, além de diretrizes para construção de filtros, drenos e dispositivos de descarga. Destacam-se, nesse contexto, o Boletim 55 (1986), que apresenta critérios para o projeto de barragens de terra e enrocamento, e o Boletim 98 (1995), que aborda os princípios de projeto e operação de vertedouros, elementos fundamentais para o controle de cheias e segurança hidráulica (ICOLD, 1986; ICOLD, 1995).

A partir das décadas de 1980 e 1990, as diretrizes internacionais passaram a incorporar, de forma mais sistemática, aspectos relacionados à segurança, ao monitoramento e à gestão de riscos. Essa evolução foi catalisada, sobretudo, por eventos críticos, como o colapso da Malpasset Dam, na França, em 1959, e da Teton Dam, nos Estados Unidos, em 1976 (FEMA, 2004). Esses desastres revelaram fragilidades não apenas nos processos construtivos, mas também na operação e no monitoramento das estruturas.

Nesse contexto, foram publicados documentos fundamentais, como o Boletim 82 (1992), que trata da seleção de cheias de projeto, e o Boletim 130 (2005), que introduz, de forma consolidada, a abordagem de Avaliação de Riscos no contexto da segurança de barragens (ICOLD, 1992; ICOLD, 2005). Essa abordagem representa um avanço significativo, pois permite considerar, de maneira estruturada, tanto as consequências potenciais de falhas quanto as probabilidades associadas a diferentes modos de ruptura.

Paralelamente, nos Estados Unidos, o desenvolvimento de um arcabouço normativo robusto ganhou corpo a partir do final da década de 1970, especialmente após o rompimento da Teton Dam. Em 1979, foram publicadas as Federal Guidelines for Dam Safety, coordenadas pela Federal Emergency Management Agency (FEMA), em colaboração com o Interagency Committee on Dam Safety (ICODS) (FEMA, 2004). Essas diretrizes estabeleceram requisitos abrangentes para projeto, construção, operação e segurança de barragens, consolidando-se como referência internacional.

Na sequência, diferentes agências norte-americanas elaboraram manuais e guias técnicos altamente especializados. Destaca-se o trabalho desenvolvido pelo United States Army

Corps of Engineers (USACE), cujos documentos incluem o EM 1110-2-2300, dedicado ao projeto de barragens de terra e enrocamento (USACE, 2004), e o ER 1110-2-1156 (2014), que aborda critérios avançados para avaliação de risco e gestão da segurança estrutural (USACE, 2014).

Simultaneamente, o United States Bureau of Reclamation (USBR) desenvolveu uma série de publicações técnicas de grande relevância, entre as quais se destaca o clássico Design of Small Dams, publicado inicialmente na década de 1960 e atualizado ao longo dos anos, consolidando-se como uma das mais importantes referências mundiais para o projeto, construção e operação de barragens (USBR, 2002).

3. METODOLOGIA

3.1 Apresentação do estudo de caso

O objeto de estudo desse trabalho é uma barragem de terra homogênea, construída com a finalidade de armazenamento de água para prevenção de secas. A estrutura é composta por uma barragem de terra homogênea associada à um vertedouro de concreto compactado a rolo (CCR), sendo o estudo focado em uma das seções instrumentadas do barramento.

A barragem estudo é composta por um maciço de terra homogênea com 2.170,00 m de comprimento e altura máxima de 25,90 m. Esse barramento possui um sistema de drenagem interna formado por um filtro vertical e filtro horizontal tipo sanduíche. A estrutura conta com duas bermas de equilíbrio a montante e à jusante.

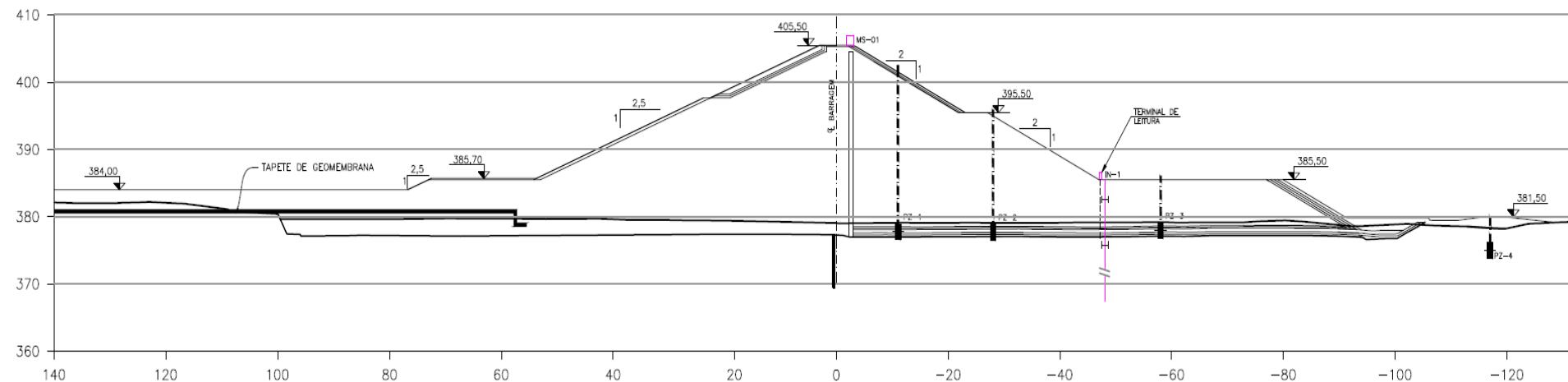
O talude de montante da barragem estudo possui inclinação de 1,0V:2,5H e o de jusante 1,0V:2,0H, a cota do coroamento se encontra na elevação 405,50 m. A proteção do talude de montante é composta por: areia, brita e *rip-rap* no local onde ocorre variação do nível do reservatório.

Durante as escavações da fundação da barragem de terra, foi observado que a formação geológica da localização era composta de uma estrutura denominada ritimoto. O ritimoto consiste em alternâncias de arenitos coerentes e siltitos ou argilitos incoerentes e podem apresentar elevada permeabilidade. Por esta razão foram projetados um tapete de solo compactado com geomembrana a montante da barragem de terra e uma cortina de injeções de calda de cimento ao longo da fundação.

A seção transversal instrumentada escolhida para fundamentar as análises neste trabalho está localizada nesta região onde foram abertos poços de inspeção durante as escavações da fundação, sendo este também o trecho onde a barragem detém sua altura máxima (Figura 3.1).

A escolha da seção transversal utilizada fundamenta-se na complexidade geotécnica da localidade, observada durante a fase de implantação da barragem. Trata-se do trecho onde se concentra a maior altura do barramento e onde foram identificadas formações geológicas com elevada permeabilidade, sendo assim, a análise desta seção permitiu avaliar os efeitos da presença e da ausência dos dispositivos de vedação e drenagem sobre o regime de percolação e estabilidade do maciço.

Figura 3.1 – Seção estudo utilizada para o estudo paramétrico



Fonte: Arquivo técnico (2025)

3.1.1 Análise paramétrica dos dispositivos de vedação e drenagem

Para o estudo paramétrico foram modeladas seções com diferentes configurações, considerando a existência do tapete impermeável, cortina de injeções de calda de cimento através do arenito de fundação e drenos internos, totalizando seis casos onde são alternadas a existência de cada um destes dispositivos (Tabela 3.1). Cada um desses casos foi concebido de forma a isolar ou combinar os efeitos dos elementos de controle hidráulico e estrutural, possibilitando a avaliação de sua influência individual e conjunta no desempenho do barramento.

O caso 01 do estudo representa a situação atual do barramento, com a presença de tapete impermeável a montante, cortina de injeção no arenito da fundação e sistema interno de drenagem. Este caso foi considerado a fim de realizar um estudo comparativo entre a situação atual e as demais situação analisadas, verificando desta forma os impactos que os dispositivos de vedação e drenagem produzem, em relação à situação real.

No Caso 2, a barragem foi avaliada sem qualquer dispositivo de vedação, estando equipada apenas com o filtro sanduíche. Essa configuração teve como propósito analisar a eficiência da drenagem atuando isoladamente, diante de um volume maior de percolação, sem barreiras à entrada de água na estrutura.

O Caso 3 corresponde à condição oposta, a estrutura conta com os dois dispositivos de vedação, mas não possui filtro sanduíche. A ausência da drenagem interna permitiu avaliar os efeitos da acumulação de pressões neutras no interior do maciço, mesmo com restrições ao fluxo de entrada de água.

Já no Caso 4, foi avaliada a contribuição isolada da cortina de injeção, sendo o tapete impermeável suprimido. A configuração também inclui o filtro sanduíche, permitindo observar o desempenho do sistema com vedação combinado à drenagem, mas sem a vedação superficial na região de montante.

No Caso 5, foram mantidos o tapete impermeável e o filtro sanduíche, porém, sem a cortina de injeção. Neste caso, a finalidade foi avaliar o desempenho da vedação superficial como principal barreira hidráulica, atuando em conjunto com a drenagem interna.

Por fim, o Caso 6 representa uma situação hipotética sem qualquer dispositivo de vedação ou drenagem, configurando o cenário mais desfavorável entre os analisados. Este caso tem o intuito de evidenciar os riscos associados à ausência total de medidas de controle, sendo fundamental para dimensionar a importância de cada elemento de segurança na estabilidade geral do barramento.

Tabela 3.1 – Casos para estudo paramétrico

Caso	Tapete impermeável (Geomembrana)	Cortina de injeção	Filtro Sanduíche	Observações
1	Sim	Sim	Sim	Situação com vedação e drenagem
2	Não	Não	Sim	Situação sem vedação
3	Sim	Sim	Não	Situação sem drenagem
4	Não	Sim	Sim	Situação sem Geomembrana
5	Sim	Não	Sim	Situação sem cortina de injeção
6	Não	Não	Não	Situação sem vedação e drenagem

Fonte: Autora (2025)

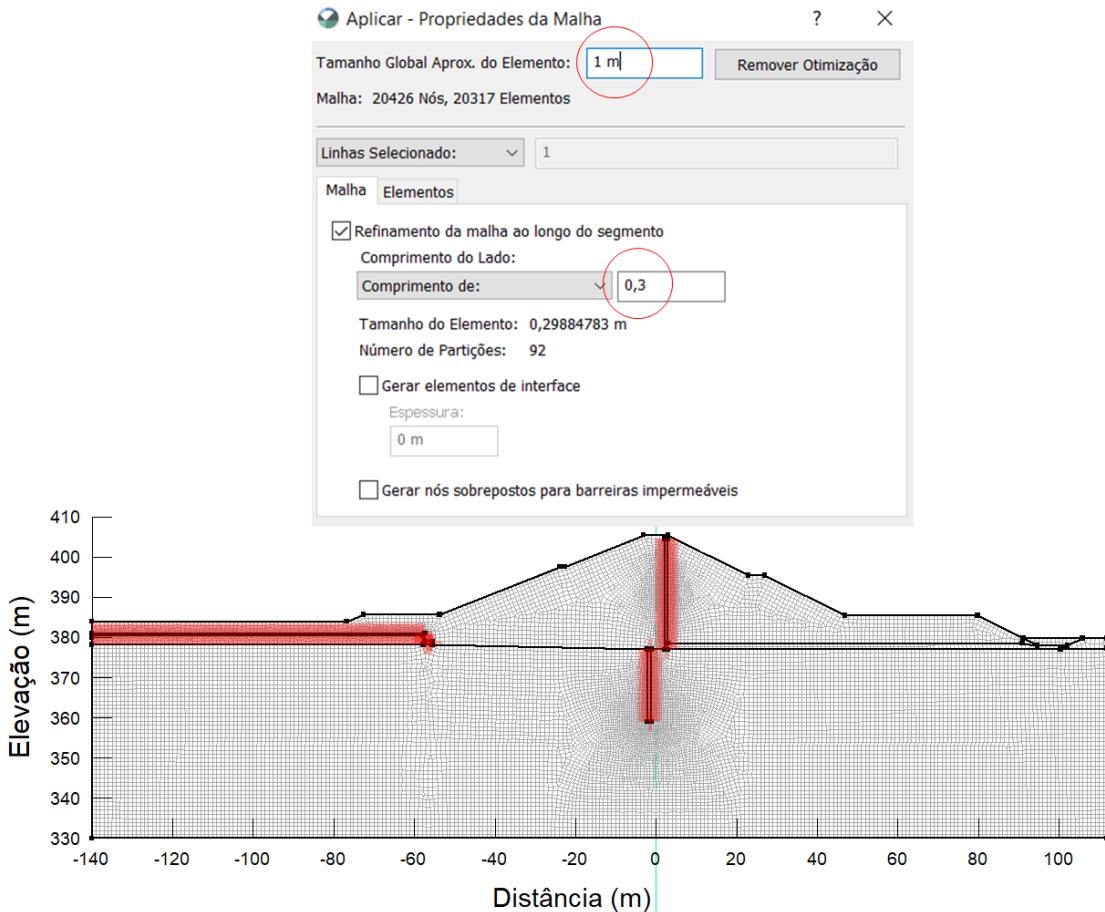
3.2 Modelagem das seções para o estudo paramétrico

A geometria da seção transversal da barragem utilizada nas simulações foi inicialmente desenvolvida no *software AutoCAD 2022*, com base na seção típica fornecida pelo projeto *as built* da obra, que foi disponibilizado para este estudo. Essa geometria foi então importada para o *Geostudio 2024*, onde foi utilizada como base para a geração da malha de elementos finitos.

A malha de elementos finitos adotada possui elementos com dimensão global aproximada de 1,0 metro, sendo aplicado um refinamento local nas regiões próximas aos dispositivos de vedação e drenagem (tapete impermeável, cortina de injeção e filtros internos), com redução do tamanho dos elementos para 0,3 metro, de modo a melhorar a discretização do domínio e a precisão dos resultados obtidos nas análises numéricas (Figura 3.2).

A seção apresentada na Figura 3.2 foi utilizada como modelo base para a construção das demais configurações analisadas neste estudo. A partir dessa geometria inicial, foram desenvolvidas as seções correspondentes aos outros cinco casos, variando-se unicamente a presença ou ausência dos dispositivos de vedação (tapete impermeável e cortina de injeção) e de drenagem (filtro sanduíche), conforme os critérios estabelecidos para a análise paramétrica.

Figura 3.2 – Malha de elementos finitos utilizada para as análises de fluxo e estabilidade



Fonte: Autora (2025)

Após a definição da malha de elementos finitos, foram realizadas às simulações computacionais utilizando os módulos *SEEP/W* e *SLOPE/W* do pacote *GeoStudio 2024*. O *SEEP/W* foi aplicado para as análises de fluxo de água através do maciço da barragem, enquanto o *SLOPE/W* foi utilizado para avaliar a estabilidade dos taludes. Cada módulo exigiu configurações específicas, tanto na definição dos materiais quanto na aplicação das condições de contorno, respeitando as particularidades de cada tipo de análise. Os próximos subtópicos apresentam, de forma detalhada, o processo adotado para a execução das análises de fluxo e, na sequência, das análises de estabilidade.

3.2.1 Análises de fluxo para os regimes permanente e transiente

Durante a fase de Projeto Executivo da barragem estudo, foi conduzido um programa abrangente de investigação geotécnica, visando à caracterização detalhada dos materiais presentes tanto na estrutura da barragem quanto em sua fundação. Foram realizados ensaios de

campo e de laboratório com o objetivo de fornecer parâmetros confiáveis para as análises executadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

No caso específico da fundação em arenito, o coeficiente de permeabilidade adotado foi obtido a partir de ensaios realizados durante a execução das sondagens rotativas. Os resultados indicaram valores na ordem de 10^{-6} m/s, significativamente inferiores aos usualmente observados para rochas areníticas, que tendem a apresentar permeabilidades mais elevadas devido ao caráter granular e à interconectividade típica de suas porosidades. Esse comportamento mais estanque observado no arenito local sugere um maciço pouco fraturado, característica que contribui para a redução do fluxo percolante através da fundação. O registro das sondagens realizadas está disponibilizado em anexo.

Complementarmente, também foram conduzidos ensaios de laboratório, incluindo análise granulométrica, limites de Atterberg, massa específica dos sólidos, ensaios de resistência, ensaios de compactação, adensamento e ensaios de permeabilidade em carga constante aplicados às amostras coletadas ao longo da investigação.

Os valores de coeficiente de permeabilidade obtidos tanto em laboratório quanto em campo foram disponibilizados para este estudo, sendo adotados como parâmetros hidráulicos de entrada nas simulações numéricas desenvolvidas no software SEEP/W. Esses valores foram organizados conforme os diferentes materiais constituintes da barragem e de sua fundação, sintetizados na Tabela 3.2.

A variação observada entre os coeficientes reflete as características esperadas de cada material, abrangendo desde elementos de elevada condutividade hidráulica, como a trincheira drenante, até materiais de baixa permeabilidade, como o aterro compactado e o próprio arenito local, cuja baixa permeabilidade reforça sua contribuição para a estabilidade hidráulica do conjunto.

Tabela 3.2 – Parâmetros de permeabilidade dos materiais que compõem a barragem estudo

Material	K (m/s)
Areia filtro	2,00E-04
Trincheira drenante	1,00E-02
Aterro compactado	1,00E-07
Colúvio	1,00E-04
Fundação em arenito	2,50E-06
Cortina de injeção	1,00E-10
Tapete impermeável	1,00E-13

Fonte: Arquivo técnico (2025)

A definição das propriedades hidráulicas dos materiais no módulo *SEEP/W*, foi realizada por meio da aba “Dados”, acessível na barra superior do *software*. Como mostra a Figura 3.3, dentro do menu, selecionou-se a opção “Materiais”, onde foi possível inserir e configurar os materiais empregados na modelagem.

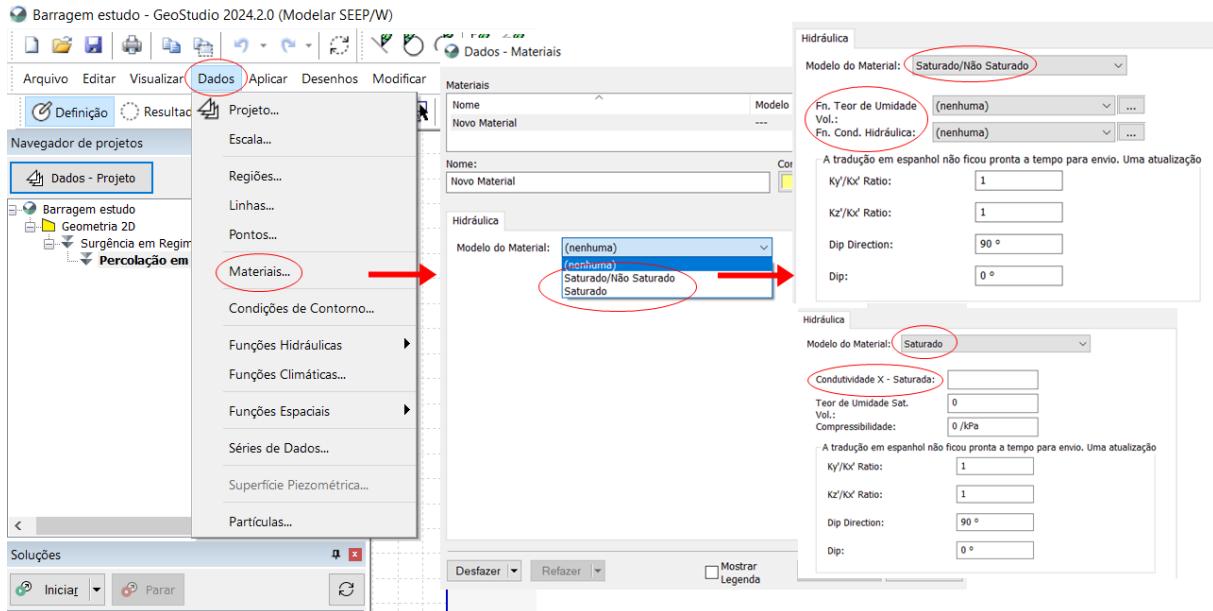
Na janela de edição de materiais, é necessário atribuir um nome ao novo material e, em seguida, selecionar o modelo hidráulico a ser utilizado. O *SEEP/W* oferece duas opções principais de modelagem: Saturado e Saturado/Não Saturado. A escolha entre esses modelos depende do regime de fluxo a ser analisado e das condições esperadas no interior do maciço durante a simulação.

Para situações em que o material permanece completamente saturado, como regiões mais profundas ou abaixo do nível freático, pode-se utilizar o modelo Saturado, que requer apenas a definição da condutividade hidráulica saturada, além de propriedades adicionais como compressibilidade do fluido e anisotropia do material. No entanto, para representar adequadamente condições em que o grau de saturação varia (como no enchimento ou rebaixamento do reservatório, ou ainda em zonas de transição próximas ao talude de jusante), deve-se utilizar o modelo Saturado/Não Saturado.

Esse modelo considera a relação entre a sucção matricial e o teor de umidade volumétrica, exigindo a definição de uma função de retenção água-solo e de uma função de condutividade hidráulica não saturada. Tais funções descrevem como a capacidade de retenção de água e a condutividade variam com a sucção, sendo fundamentais para simular com precisão o fluxo em meios parcialmente saturados.

Essas curvas podem ser determinadas a partir de modelos empíricos amplamente consolidados na literatura geotécnica. Entre os modelos mais utilizados destacam-se o proposto por van Genuchten (1980) e o desenvolvido por Fredlund e Xing (1994). Ambos permitem representar o comportamento hidráulico de solos não saturados de forma contínua e parametrizada, sendo compatíveis com o *SEEP/W* e frequentemente utilizados em análises numéricas de fluxo.

Figura 3.3 – Inserção dos dados dos materiais no modelo do *SEEP/W*



Fonte: Autora (2025)

Após a definição das propriedades dos materiais, podem ser definidas as condições de contorno na modelagem de fluxo, para isto utiliza-se o menu “Dados”, no qual se encontra a opção “Condições de Contorno”, conforme ilustrado na Figura 3.4. A partir dessa interface, é possível gerenciar as condições hidráulicas que irão orientar o comportamento do fluxo na seção analisada.

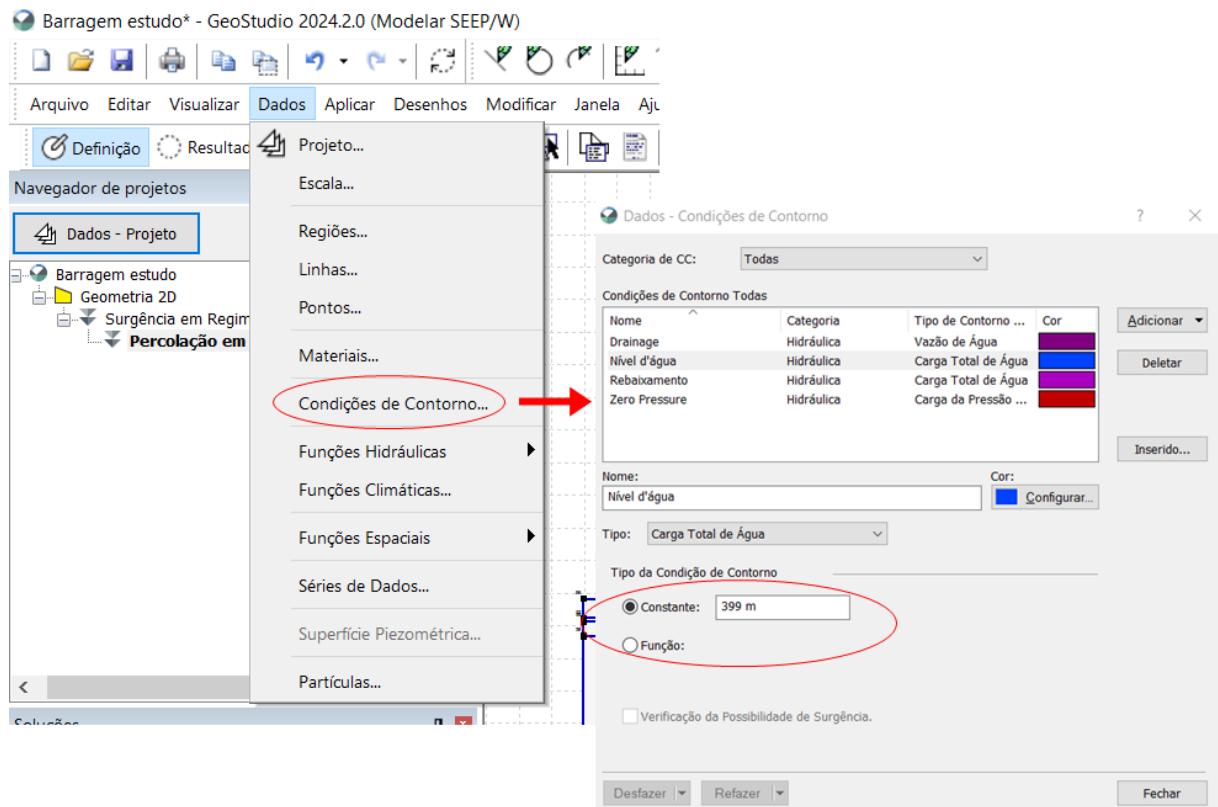
O programa já disponibiliza, de forma pré-definida, algumas condições, como “*Drainage*” (associada a uma condição de vazão de água) e “*Zero Pressure*” (representando a superfície livre ou uma interface com pressão atmosférica), que podem ser diretamente aplicadas às regiões correspondentes da geometria. Para representar adequadamente as condições de montante, no entanto, foi necessário adicionar duas novas condições de contorno, que foram denominadas “*Nível d’água*” e “*Rebaixamento*”.

A condição “*Nível d’água*” foi configurada como uma carga total de água constante, representando o nível do reservatório para a análise em regime permanente. Já a condição de “*Rebaixamento*”, utilizada exclusivamente nas análises em regime transiente, foi definida por meio de uma função de variação temporal, simulando a redução gradual do nível do reservatório ao longo do tempo.

A função atribuída à condição de rebaixamento neste estudo corresponde a uma variação linear de 10 metros em 10 dias, o que representa uma taxa de rebaixamento de 1 metro por dia. Esta condição de contorno permite simular cenários de esvaziamento controlado do

reservatório, sendo útil para a avaliação do comportamento do fluxo em situações transientes e para a posterior análise de estabilidade dos taludes durante um rebaixamento.

Figura 3.4 - Inserção das condições de contorno no modelo do *SEEP/W*



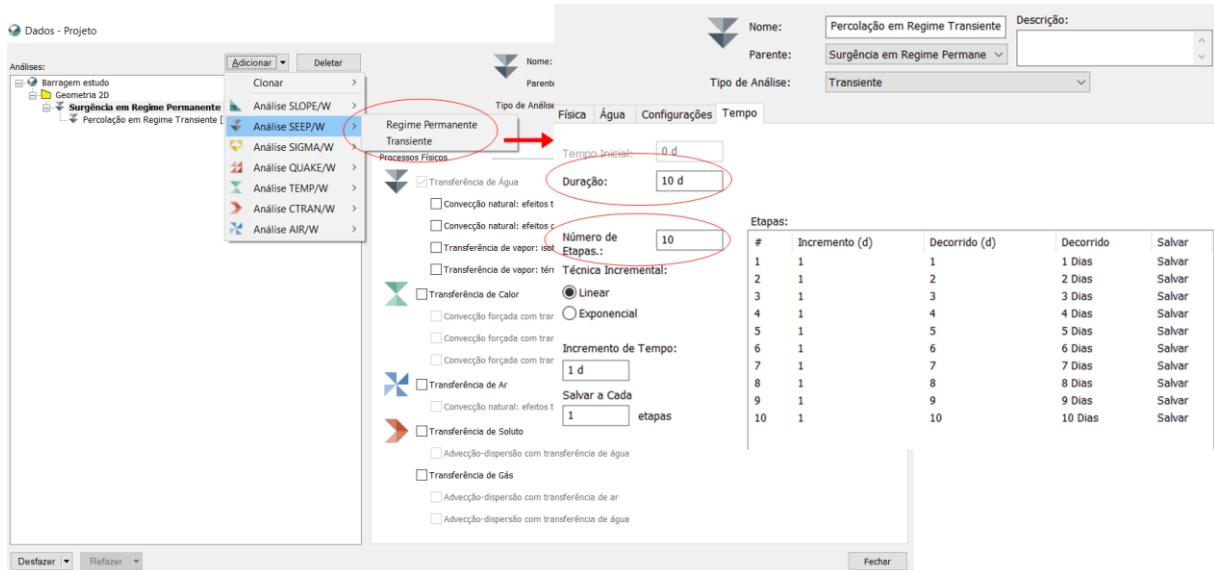
Fonte: Autora (2025)

Para a definição do tipo de análise no módulo *SEEP/W*, seleciona-se o menu “Dados - Projeto” e, em seguida, a opção “Adicionar”, conforme indicado na Figura 3.5. Nesta etapa, é possível configurar a análise como de regime permanente ou regime transiente, dependendo do caso que estará sendo analisado.

A opção regime permanente é utilizada quando se deseja simular uma condição estática, ou seja, um estado em que o fluxo de água através do maciço não varia ao longo do tempo. Esta abordagem é adequada para avaliar situações de estabilidade sob condições hidráulicas constantes, como o nível normal de operação do reservatório.

Já ao selecionar a opção de regime transiente, o programa permite a simulação de processos que envolvem variações temporais das condições hidráulicas, como ocorre em cenários de rebaixamento do nível de água. Na aba “Tempo”, como mostra a Figura 3.5, definem-se os parâmetros da análise transiente.

Figura 3.5 – Tipos de análises realizadas pelo *SEEP/W*



Fonte: Autora (2025)

As análises realizadas para este estudo foram feitas de acordo com as condições operacionais e críticas de uma barragem de terra, de forma a representar cenários realistas de atuação dos sistemas de vedação e drenagem.

Foram conduzidas análises em regime permanente para simular a condição de operação normal do reservatório, em que se assume que o maciço está em equilíbrio hidráulico, ou seja, adensado e com drenagem efetiva, representando uma condição drenada (CD). Esse tipo de análise permite avaliar o comportamento da estrutura sob a carga hidráulica constante do nível de água em montante, sendo particularmente relevante para a verificação da segurança em situações estáveis e prolongadas.

Adicionalmente, foram realizadas análises em regime transiente para simular situações de rebaixamento rápido do nível d'água no reservatório, nas quais o gradiente hidráulico varia com o tempo e há redistribuição das poropressões no interior do maciço. Nestes casos, o comportamento da barragem é mais crítico, visto que o material se encontra adensado, porém sem tempo suficiente para dissipaçāo das pressões neutras, caracterizando uma condição não drenada (CU). Esse cenário representa um dos estados mais exigentes em termos de estabilidade, sendo essencial para a avaliação do desempenho do sistema em condições emergenciais, como esvaziamento rápido do reservatório. Por esta razão, esta análise foi realizada para o presente estudo.

3.2.2 Análises de estabilidade por equilíbrio limite

Para a análise de estabilidade da barragem, foram adotados parâmetros de resistência obtidos a partir dos ensaios realizados em campo e em laboratório durante a fase de projeto executivo, conforme supracitado no tópico anterior. Os valores obtidos nestes ensaios foram disponibilizados para o presente estudo.

Dentre os ensaios laboratoriais realizados, para a análise de estabilidade destacam-se os ensaios de cisalhamento direto e os triaxiais, realizados em diferentes condições de carregamento e drenagem. Esses ensaios permitiram a determinação da coesão efetiva (c') e do ângulo de atrito interno efetivo (ϕ') para os materiais que compõem o barramento.

Como complemento às investigações, foram realizados ensaios de campo, como o ensaio de penetração padrão (SPT), cujos resultados auxiliaram na identificação das camadas de solo e na estimativa preliminar de parâmetros geotécnicos, principalmente nas regiões em que não foi possível obter amostras adequadas para os ensaios laboratoriais.

A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados na modelagem numérica, abrangendo os diferentes materiais que compõem o maciço, a fundação e os dispositivos de vedação e drenagem da barragem. Tais parâmetros foram aplicados nas simulações de estabilidade realizadas no software *SLOPE/W*, utilizando o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price, que permite a consideração de diferentes condições de carregamento e distribuição de forças ao longo da superfície de ruptura.

Tabela 3.3 – Parâmetros de resistência utilizados na modelagem

Material	$\gamma_{seco}(\text{kN/m}^3)$	$c' (\text{kPa})$	$\phi' (^\circ)$
Areia filtro	20	0	30°
Trincheira drenante	22	0	35°
Aterro compactado	20	10	32°
Colúvio	20	0	30°
Fundação em arenito	26	100	35°
Cortina de injeção	19	11	29°
Tapete impermeável	20	0	10°

Fonte: Arquivo técnico (2025)

O método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price é amplamente reconhecido na engenharia geotécnica por sua precisão na análise da estabilidade de taludes. Diferentemente de métodos simplificados, ele considera simultaneamente o equilíbrio de forças e de momentos ao longo de superfícies de ruptura arbitrárias (MORGENSTERN; PRICE, 1965).

Nesse método, o maciço é dividido em fatias verticais, e são analisadas as forças que atuam em cada uma delas, como o peso próprio, as forças cisalhantes na base e as interações entre fatias vizinhas. Um dos diferenciais do método está na possibilidade de definir uma função de distribuição para as forças *interslice*, que pode assumir diferentes formas (constante, linear, parabólica, entre outras), o que confere maior flexibilidade à análise e favorece a convergência dos resultados numéricos.

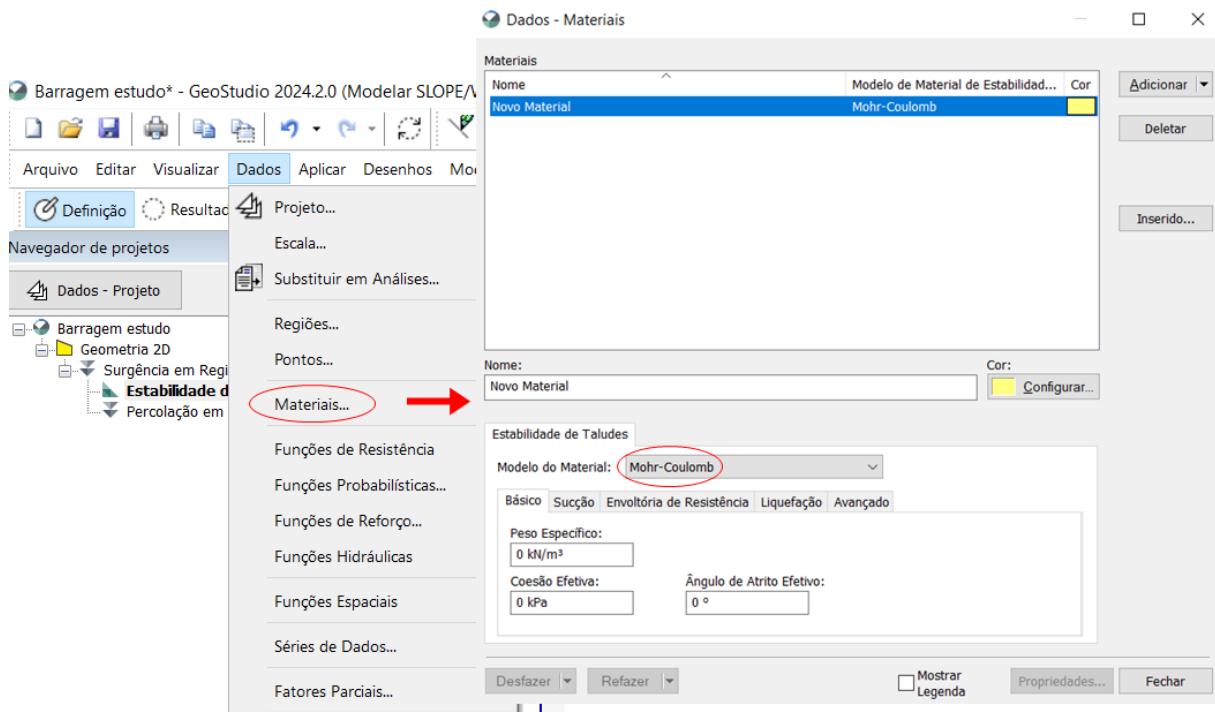
O método de Morgenstern-Price é habitualmente utilizado em estudos que exigem maior detalhamento da resposta estrutural do maciço, como é o caso de barragens de terra. Por essa razão, foi o procedimento adotado no presente trabalho para as análises de estabilidade realizadas no software *SLOPE/W*.

A inserção das propriedades dos materiais no módulo *SLOPE/W* do *GeoStudio* segue o método ilustrado na Figura 3.6. O processo inicia-se no menu superior com a seleção da aba "Dados", seguida da opção "Materiais". Essa etapa permite acessar a janela de definição dos materiais que serão utilizados nas análises de estabilidade do talude.

Na interface de configuração dos materiais, deve-se criar um novo material clicando em "Adicionar". Em seguida, o usuário pode nomeá-lo e definir o modelo de resistência a ser adotado. Neste estudo, optou-se pelo modelo clássico de Mohr-Coulomb (MOHR; COULOMB, 1871). Com o modelo selecionado, são inseridos os principais parâmetros de resistência ao cisalhamento: o peso específico (γ), a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito interno efetivo (ϕ'), obtidos a partir dos ensaios laboratoriais e de campo previamente descritos.

Além disso, a interface oferece abas complementares que permitem refinar a caracterização do material, como as opções de sucção, resistência envoltória, liquefação e propriedades avançadas, funcionalidades úteis em análises mais complexas, embora não tenham sido utilizadas no presente estudo.

Figura 3.6 - Inserção dos dados dos materiais no modelo do *SLOPE/W*



Fonte: Autora (2025)

A Figura 3.7 ilustra o processo de definição da superfície de pesquisa, que é realizado a partir do menu principal, acessando-se a opção “Aplicar > Superfície de Pesquisa > Entrada e Saída”. A área de pesquisa é definida por meio da inserção das coordenadas dos pontos extremos e pela especificação do número de divisões, tanto ao longo da base quanto no raio das superfícies geradas. Essa discretização influencia diretamente na precisão da análise, uma vez que um número maior de divisões permite uma busca mais refinada da superfície crítica, ainda que aumente o tempo de processamento.

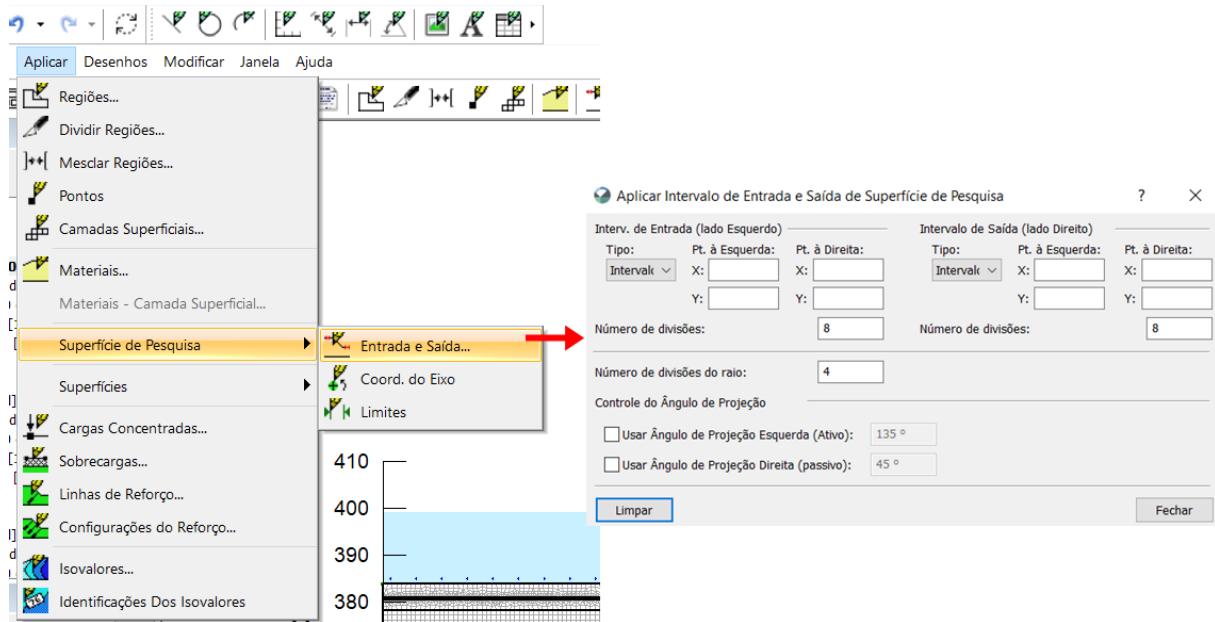
Além disso, é possível controlar a orientação das superfícies por meio da definição dos ângulos de projeção ativa e passiva, o que pode ser útil em situações específicas em que se deseja restringir a direção do possível deslizamento. Com essas informações, o programa executa uma série de simulações para diferentes geometrias de superfície dentro da região especificada, utilizando algoritmos próprios, como o de Morgenstern-Price, adotado no presente estudo, para calcular os fatores de segurança associados.

Alternativamente, o processo de definição da superfície de ruptura pode ser feito de forma manual, diretamente sobre a seção do modelo no ambiente gráfico do *software*. Desta forma, o usuário desenha a superfície desejada com base em critérios técnicos ou hipóteses de

projeto, o que pode ser útil em análises exploratórias ou na verificação de condições específicas de ruptura previamente estabelecidas.

Ao final da análise, o *SLOPE/W* identifica a superfície crítica de ruptura, caracterizada por apresentar o menor fator de segurança dentre todas as superfícies avaliadas. Essa superfície representa a condição mais desfavorável de estabilidade do talude.

Figura 3.7 - Inserção da superfície de pesquisa no modelo do *SLOPE/W*

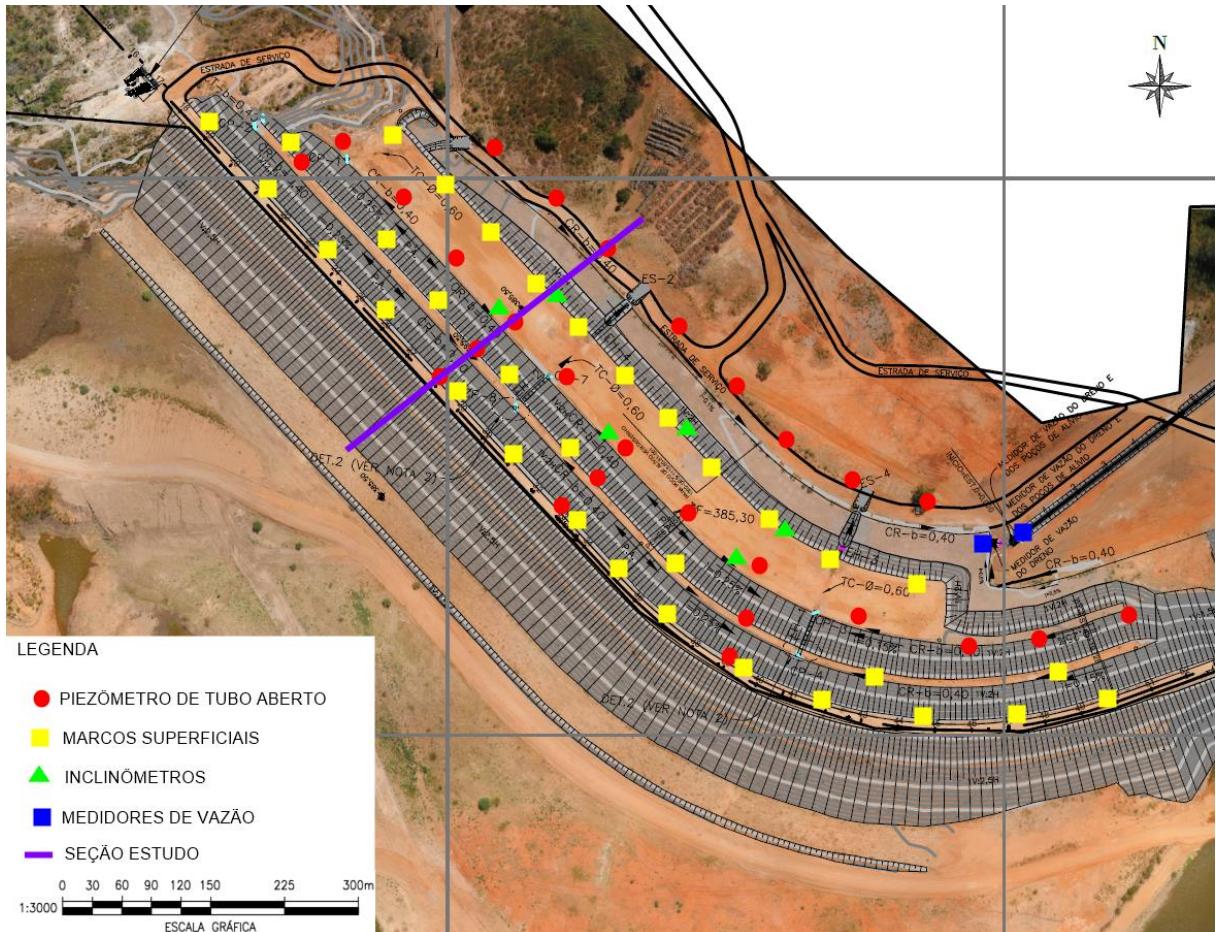


Fonte: Autora (2025)

3.3 Instrumentação da barragem

Com o objetivo de monitorar o comportamento da barragem estudo, bem como o funcionamento do sistema de drenagem interna durante a operação da estrutura, foram instalados no barramento os seguintes instrumentos: 27 piezômetros de tubo aberto, 02 Medidores de Vazão, 33 Marcos Superficiais e 06 Inclinômetros. A localização dos instrumentos e da seção selecionada para a realização das análises deste trabalho encontram-se destacados na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Localização dos instrumentos da barragem estudo



Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

Os registros dos piezômetros forneceram dados sobre a distribuição das pressões neutras ao longo da barragem, possibilitando a determinação da linha piezométrica em regime permanente. A cota piezométrica média mais elevada foi observada no PZ-20 (383,12 m), enquanto a menor foi registrada no PZ-04 (376,19 m). Essa variação indica a presença de um gradiente hidráulico entre montante e jusante, característico do funcionamento esperado da estrutura (Tabela 3.4).

Os piezômetros localizados mais a montante registraram as maiores cotas piezométricas, o que era esperado dada a proximidade com o espelho d'água. Por outro lado, os piezômetros de jusante apresentam cargas hidráulicas mais baixas, indicando que o sistema de drenagem está contribuindo para o rebaixamento da linha freática.

A maioria dos instrumentos apresentou variações coerentes com o carregamento do reservatório e com a presença dos dispositivos de vedação e drenagem. Os valores médios se mostraram estáveis, não indicando flutuações abruptas que possam estar relacionadas a recarga intensa ou instabilidade hidráulica. Apenas um piezômetro (PZ-13) encontra-se inoperante.

Os medidores de vazão estão localizados a jusante, na saída do sistema de drenagem. Essa posição é coerente com o objetivo dos instrumentos, que é captar o volume de água drenado pelo sistema interno, permitindo inferências sobre a eficiência dos filtros e drenos.

Os medidores de vazão MV-01 e MV-02 apresentaram médias de 1300,00 l/min e 1425,00 l/min, respectivamente (Tabela 3.5). Esses valores indicam níveis moderados de percolação, porém, compatíveis com a atuação eficiente do sistema de drenagem. A diferença entre as vazões máxima e mínima registradas indica um comportamento variável, influenciado por variações sazonais no nível do reservatório e pela resposta do sistema de drenagem a eventos de recarga, como chuvas intensas.

Tabela 3.4 – Registros dos piezômetros da barragem estudo

Instrumento	Identificação	Cota de Instalação (m)	Maior registro (m)	Menor registro (m)	Média dos registros (m)	Situação
Piezômetro de tubo aberto	PZ-01	376,62	378,92	376,65	378,25	Operante
	PZ-02	376,61	378,00	378,14	378,10	Operante
	PZ-03	376,15	376,92	373,87	376,30	Operante
	PZ-04	369,60	376,46	373,85	376,19	Operante
	PZ-05	377,50	380,46	379,46	379,96	Operante
	PZ-06	377,75	380,72	379,72	380,22	Operante
	PZ-07	377,66	380,62	379,62	380,12	Operante
	PZ-08	377,55	380,52	379,52	380,02	Operante
	PZ-09	377,71	380,67	379,67	380,17	Operante
	PZ-10	377,69	380,66	379,66	380,16	Operante
	PZ-11	377,71	380,67	379,67	380,17	Operante
	PZ-12	377,96	380,92	379,92	380,42	Operante
	PZ-13	377,89	380,86	379,86	380,36	Inoperante
	PZ-14	377,81	380,78	379,78	380,28	Operante
	PZ-15	377,87	380,84	379,84	380,34	Operante
	PZ-16	378,03	381,00	380,00	380,50	Operante
	PZ-17	377,88	380,84	379,84	380,34	Operante
	PZ-18	377,83	380,79	379,79	380,29	Operante
	PZ-19	379,65	382,62	381,62	382,12	Operante
	PZ-20	380,66	383,62	382,62	383,12	Operante
	PZ-25	375,00	377,96	376,96	377,46	Operante
	PZ-26	375,00	377,96	376,96	377,46	Operante
	PZ-27	375,00	377,96	376,96	377,46	Operante
	PZ-28	375,00	377,96	376,96	377,46	Operante
	PZ-29	375,00	377,96	376,96	377,46	Operante
	PZ-30	375,00	377,96	376,96	377,46	Operante
	PZ-31	375,00	377,96	376,96	377,46	Operante
	PZ-32	375,00	377,96	376,96	377,46	Operante

Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

Tabela 3.5 - Registros dos medidores de vazão da barragem estudo

Instrumento	Identificação	Cota de Instalação (m)	Maior registro (l/min)	Menor registro (l/min)	Média dos registros (l/min)	Situação
Medidores de vazão	MV-01	379,31	1600,00	40,00	1300,00	Operante
	MV-02	378,99	1500,00	22,00	1425,00	Operante

Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

Os marcos superficiais estão uniformemente distribuídos ao longo do eixo da crista e também no talude de jusante, permitindo o monitoramento de recalques em todo o maciço. A análise espacial mostra que os recalques não estão concentrados em nenhuma região específica da estrutura, o que, associado aos valores homogêneos registrados, indica um comportamento estrutural uniforme e ausência de deformações localizadas que possam comprometer a integridade da barragem.

Os registros dos marcos superficiais indicaram deslocamentos verticais discretos, da ordem de décimos de milímetro, com valores médios estimados a partir do marco MS-01 em torno de 0,11 m (Tabela 3.6). As pequenas variações observadas entre os diversos pontos instrumentados sugerem recalques compatíveis com a consolidação do maciço e ausência de recalques diferenciais significativos. A estabilidade dos recalques sugere bom desempenho da fundação e do corpo da barragem.

Os inclinômetros estão posicionados na região central da barragem, estrategicamente instalados próximos ao eixo vertical do maciço. Essa escolha é adequada para captar possíveis deslocamentos horizontais originados por esforços de empuxo do reservatório ou por variações de poropressão interna.

Os deslocamentos máximos no eixo longitudinal (montante-jusante) variaram de 4 mm (IN-03) até 10 mm (IN-06), enquanto os deslocamentos transversais (esquerda-direita) ficaram entre 2 mm e 7 mm (Tabela 3.7).

O IN-06, que apresentou o maior deslocamento longitudinal, encontra-se instalado na cota 370,21 m, região próxima à fundação do barramento. Esse fato pode estar relacionado a movimentos de acomodação do maciço, sobretudo em fases iniciais de operação. Apesar disso, os valores registrados são compatíveis com limites técnicos aceitáveis para barragens de terra, conforme observado por autores como Duncan et al. (2014), que indicam valores de até 20 mm como aceitáveis em estruturas em operação, desde que sem evolução significativa.

Tabela 3.6 - Registros dos marcos superficiais da barragem estudo

Instrumento	Identificação	Cota de Instalação (m)	Maior registro (m)	Menor registro (m)	Média dos registros (m)	Situação
Marcos superficiais	MS-01	405,22	0,15	0,01	0,11	Operante
	MS-02	405,14	0,15	0,02	0,05	Operante
	MS-03	405,20	0,16	0,01	0,12	Operante
	MS-04	405,32	0,14	0,02	0,11	Operante
	MS-05	405,17	0,16	0,02	0,13	Operante
	MS-06	405,11	0,17	0,02	0,12	Operante
	MS-07	405,14	0,14	0,01	0,11	Operante
	MS-08	405,12	0,14	0,01	0,11	Operante
	MS-09	405,21	0,14	0,00	0,10	Operante
	MS-10	405,13	0,15	0,01	0,11	Operante
	MS-11	405,12	0,15	0,02	0,11	Operante
	MS-12	405,11	0,14	0,00	0,10	Operante
	MS-13	405,12	0,15	0,01	0,10	Operante
	MSA-01	395,55	0,14	0,01	0,11	Operante
	MSA-02	395,52	0,15	0,02	0,12	Operante
	MSA-03	395,50	0,14	0,00	0,10	Operante
	MSA-04	395,46	0,15	0,02	0,12	Operante
	MSA-05	395,44	0,14	0,02	0,11	Operante
	MSA-06	395,47	0,14	0,00	0,10	Operante
	MSA-07	395,44	0,14	0,00	0,10	Operante
	MSA-08	395,41	0,14	0,00	0,11	Operante
	MSA-09	395,38	0,15	0,01	0,11	Operante
	MSJ-01	385,52	0,17	0,03	0,12	Operante
	MSJ-02	385,55	0,16	0,03	0,12	Operante
	MSJ-03	385,51	0,15	0,02	0,11	Operante
	MSJ-04	385,52	0,16	0,02	0,12	Operante
	MSJ-05	385,55	0,17	0,02	0,12	Operante
	MSJ-06	385,51	0,16	0,02	0,12	Operante
	MSJ-07	385,56	0,16	0,01	0,11	Operante
	MSJ-08	385,51	0,17	0,03	0,13	Operante
	MSJ-09	385,52	0,15	0,01	0,11	Operante
	MSJ-10	385,49	0,16	0,01	0,11	Operante

Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

Tabela 3.7 - Registros dos inclinômetros da barragem estudo

Instrumento	Identificação	Cota de Instalação (m)	Deslocamento horizontal Máximo (montante -jusante) (mm)	Deslocamento horizontal máximo (esquerda-direita) (mm)	Situação
Inclinômetros	IN-01	370,50	8,00	7,00	Operante
	IN-02	369,72	5,00	2,00	Operante
	IN-03	369,76	4,00	3,00	Operante
	IN-04	369,55	9,00	5,00	Operante
	IN-05	370,52	6,00	7,00	Operante
	IN-06	370,21	10,00	5,00	Operante

Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

A análise conjunta dos registros dos instrumentos confirma que a barragem se comporta de maneira estável sob as condições monitoradas. Os piezômetros indicam um fluxo bem distribuído com redução de gradiente hidráulico, os marcos superficiais mostram recalques controlados e distribuídos de forma uniforme, os inclinômetros não detectaram movimentos horizontais relevantes e os medidores de vazão revelam um bom funcionamento do sistema de drenagem interna.

Na seção de resultados, será apresentada uma análise mais detalhada dos instrumentos instalados na seção transversal da barragem que foi adotada para o presente estudo. Essa seção foi selecionada por apresentar representatividade em termos de comportamento hidráulico e estrutural, além de conter um conjunto completo de instrumentos operantes, que forneceram dados importantes para a calibração do modelo.

3.3.1 *Calibração do modelo*

A calibração do modelo numérico desenvolvido no *SEEP/W* visou ajustar os parâmetros hidráulicos do modelo, especialmente a permeabilidade dos materiais constituintes, de modo que os resultados obtidos por meio da simulação reproduzissem, com boa aproximação, os dados provenientes do sistema de instrumentação piezométrica instalado na estrutura.

Para calibração do modelo elaborado para a barragem em estudo, foram utilizados como referência os registros dos 04 piezômetros instalados na seção estudo (PZs 01, 02, 03 e 04), ajustando os valores de permeabilidade dos materiais e anisotropia do aterro compactado, a fim de manter uma fidelidade entre os valores do modelo e os valores reais medidos em campo.

Os piezômetros, ao fornecerem leituras diretas de carga hidráulica em pontos específicos da barragem e de sua fundação, permitem a construção de perfis de linha de carga ao longo de seções transversais. Esses perfis são, então, comparados com os resultados obtidos nas simulações numéricas. A principal variável de controle na calibração é a carga total (H), composta pela soma da altura piezométrica e da elevação topográfica do ponto de medição, conforme definido pela equação de Bernoulli.

Durante o processo de calibração, foram realizadas sucessivas simulações, ajustando-se os coeficientes de permeabilidade e anisotropia dos diferentes estratos de solo até que a distribuição simulada de poropressão estivesse compatível com os dados registrados em campo.

O uso de dados de instrumentação para calibração e validação de modelos numéricos está em conformidade com as diretrizes estabelecidas por normas técnicas e literatura especializada, como a ISO 14688-2 (2017) e a ABNT NBR 11682 (2009), além das recomendações do próprio manual do *GeoStudio* (GEOSLOPE International Ltd., 2021).

4. RESULTADOS

4.1 Análise dos registros da instrumentação da seção estudo

A seção representativa do barramento foi instrumentada com 04 piezômetros, 01 marco superficial e 01 inclinômetro. A Tabela 4.1 mostra informações gerais acerca dos instrumentos da seção, com a cota de instalação, afastamento em relação ao eixo do barramento e uma média dos registros realizados entre dezembro de 2021 e dezembro de 2024, período de 03 anos em que os registros permaneceram estáveis, após o enchimento do reservatório.

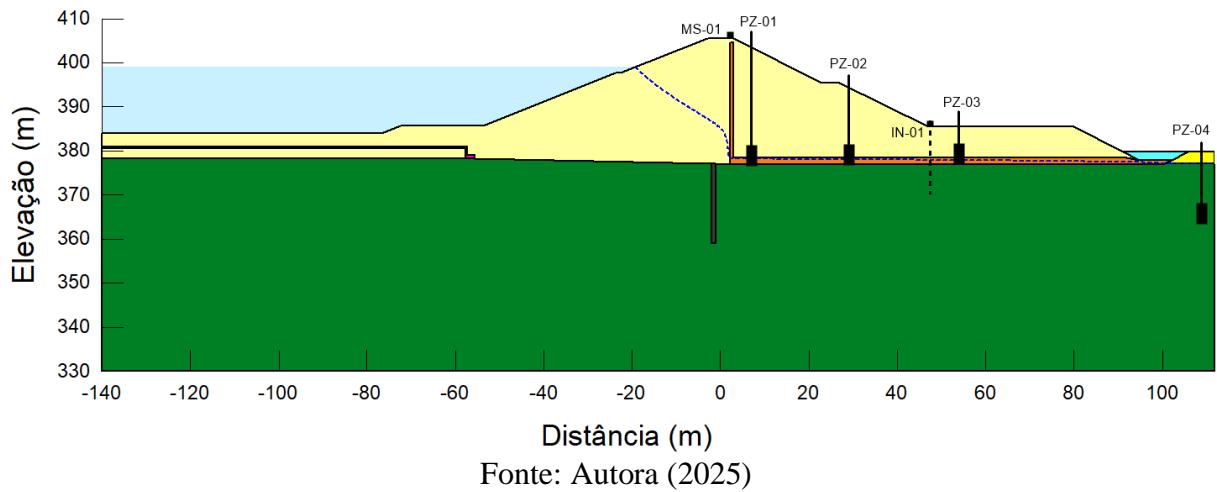
Tabela 4.1 – Instrumentos instalados na seção estudo

Instrumentos		Cota de instalação (m)	Afastamento (m)	Média dos registros (m)
Piezometria	Piezômetro 01 (PZ-01)	376,62	5,12	378,25
	Piezômetro 02 (PZ-02)	376,61	30,05	378,10
	Piezômetro 03 (PZ-03)	376,15	57,40	376,30
	Piezômetro 04 (PZ-04)	369,60	112,20	376,19
Deslocamento	Marco superficial 01 (MS-01)	405,22	2,05	0,11
	Inclinômetro 01 (IN-01)	370,50	49,21	-

Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

A análise dos registros obtidos nos instrumentos instalados ao longo da seção representativa do barramento, permitiu avaliar a evolução das pressões neutras, da linha de fluxo e dos deslocamentos da seção ao longo do tempo. A Figura 4.1 apresenta a disposição dos instrumentos ao longo da seção, enquanto as Figuras Figura 4.2 a Figura 4.5 ilustram a evolução temporal das grandezas registradas por cada instrumento.

Figura 4.1 – Disposição dos instrumentos na seção estudo



O piezômetro PZ-01, localizado no filtro horizontal, próximo ao eixo da barragem, apresentou cargas hidráulicas relativamente constantes e significativamente inferiores ao nível do reservatório, variando em torno da cota 378 m, ou seja, cerca de 10 a 20 metros abaixo do nível do reservatório, mesmo após as três elevações graduais registradas a partir de 2018 (Figura 4.2). Este comportamento indica uma eficiente atuação dos elementos de vedação instalados na região de montante, como o tapete impermeável e a cortina de injeção, que reduzem a percolação e impedem o acúmulo de pressões neutras elevadas nessa porção do maciço.

O piezômetro PZ-02, também localizado no filtro horizontal, apresentou comportamento similar ao do PZ-01, com cargas hidráulicas praticamente constantes (Figura 4.3). Tal padrão também evidencia a eficácia da vedação e dos filtros internos em limitar o desenvolvimento de gradientes críticos.

Figura 4.2 – Gráfico dos registros do piezômetro 01

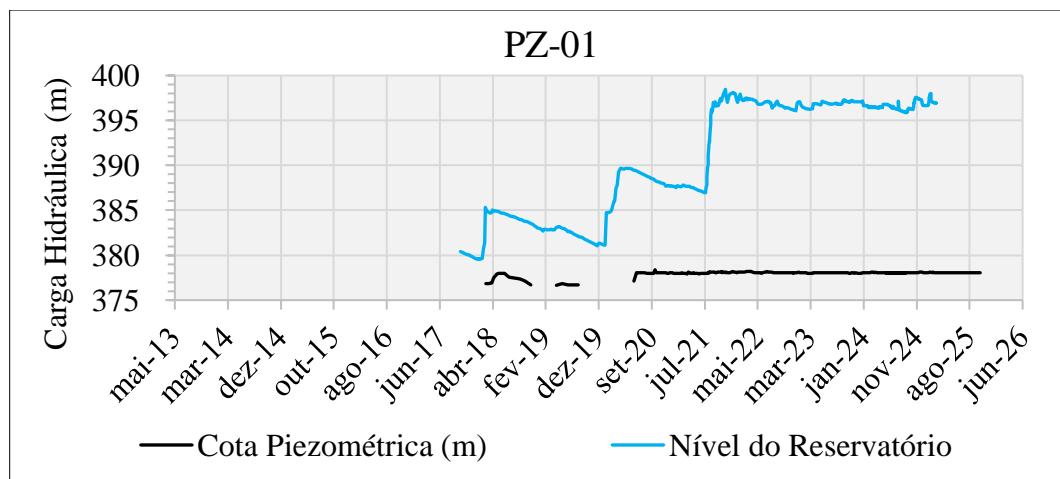
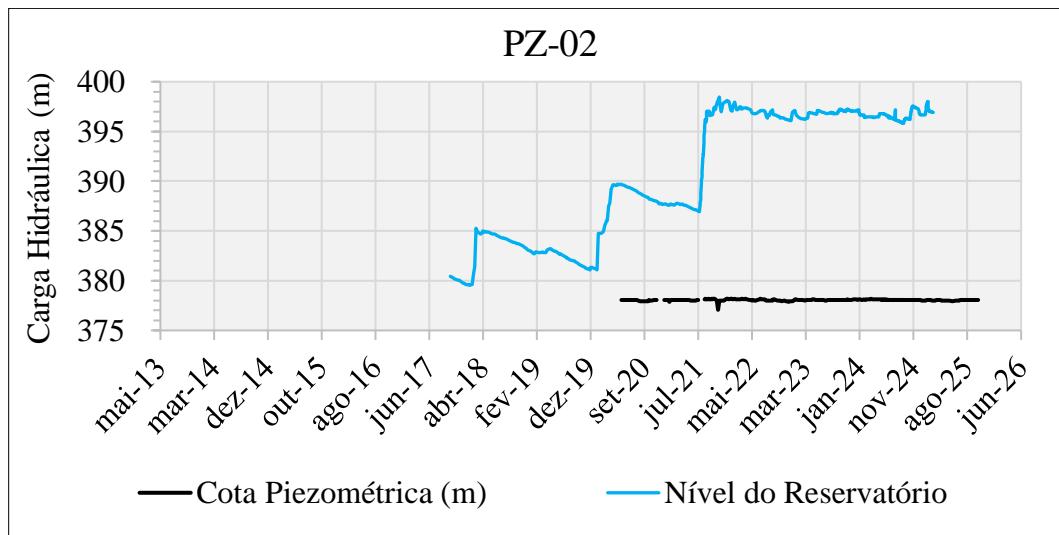


Figura 4.3 - Gráfico dos registros do piezômetro 02



Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

O piezômetro PZ-03 está localizado na extremidade do filtro horizontal, na porção mais próxima à trincheira drenante. Trata-se de uma posição crítica, pois representa o ponto de saída do fluxo percolado. Apesar disso, os dados mostram que as cargas hidráulicas permanecem baixas e estáveis, situando-se próximas à cota 373 m (Figura 4.4).

O comportamento do PZ-03 é especialmente relevante, pois demonstra que não há sobrepressões nem acúmulo de água no ponto de descarga da drenagem, o que é indicativo da boa eficiência e funcionamento contínuo do filtro e da trincheira drenante.

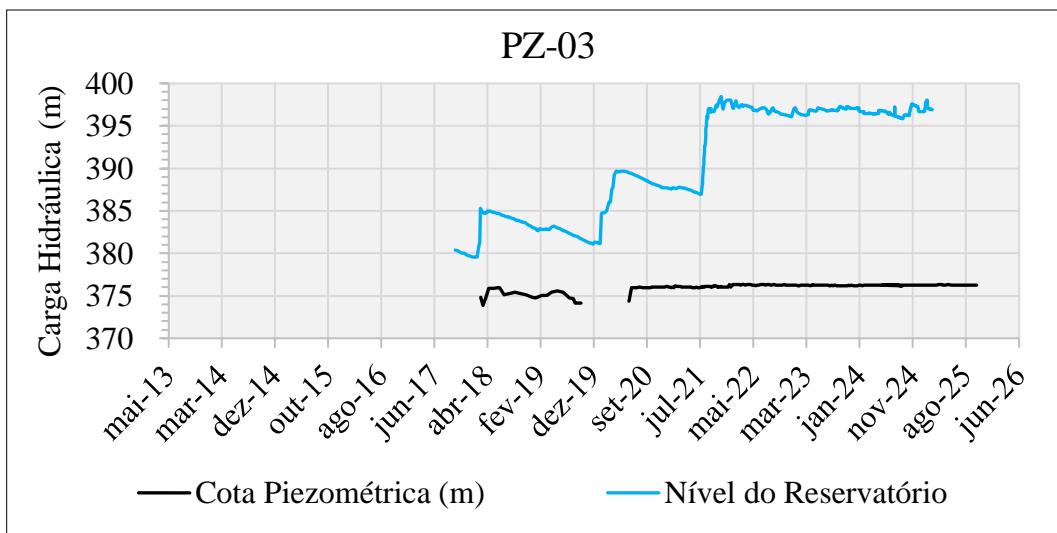
O piezômetro PZ-04 está posicionado além da zona do filtro, na fundação do barramento, a jusante da trincheira drenante. Entre os instrumentos analisados, este apresenta os menores valores de carga hidráulica, com leituras médias de 376,19 m (Figura 4.5).

De maneira geral, os registros indicam um comportamento hidráulicamente estável ao longo do tempo, mesmo após as sucessivas elevações do nível do reservatório, que passou de aproximadamente 385 m para cerca de 397 m entre os anos de 2018 e 2021.

A comparação entre os piezômetros instalados no filtro horizontal (PZ-01, PZ-02 e PZ-03) revela um comportamento coerente e gradualmente decrescente no sentido montante-jusante, refletindo a perda de carga natural associada ao escoamento ao longo do sistema de drenagem. Essa tendência evidencia que não há obstruções, zonas de sobrepressão nem descontinuidades hidráulicas significativas no interior do filtro, e que a água percolada está sendo devidamente interceptada e conduzida até a saída.

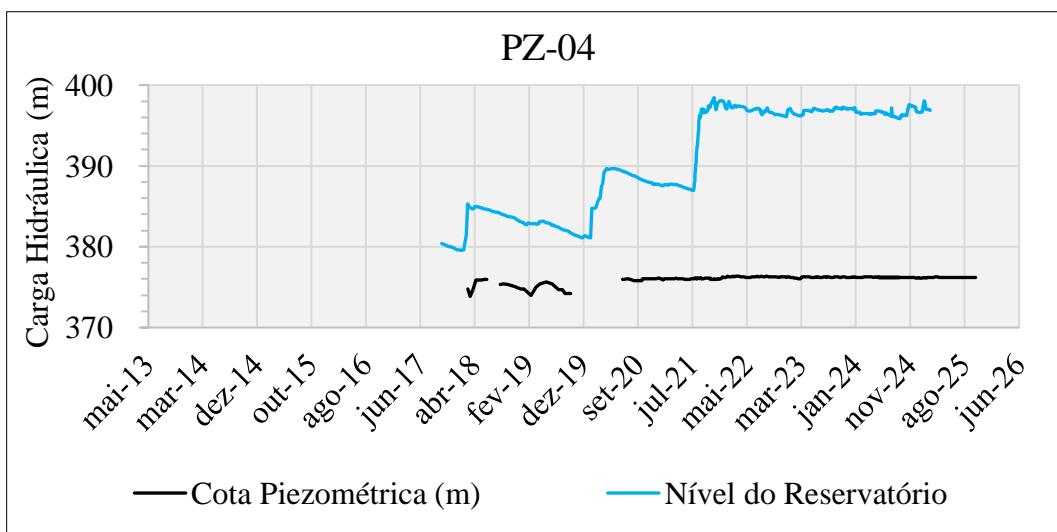
Além disso, a ausência de variações significativas nos registros ao longo dos anos e a inexistência de tendência de aumento nas leituras reforçam que o barramento se encontra sob regime de fluxo permanente.

Figura 4.4 - Gráfico dos registros do piezômetro 03



Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

Figura 4.5 - Gráfico dos registros do piezômetro 04

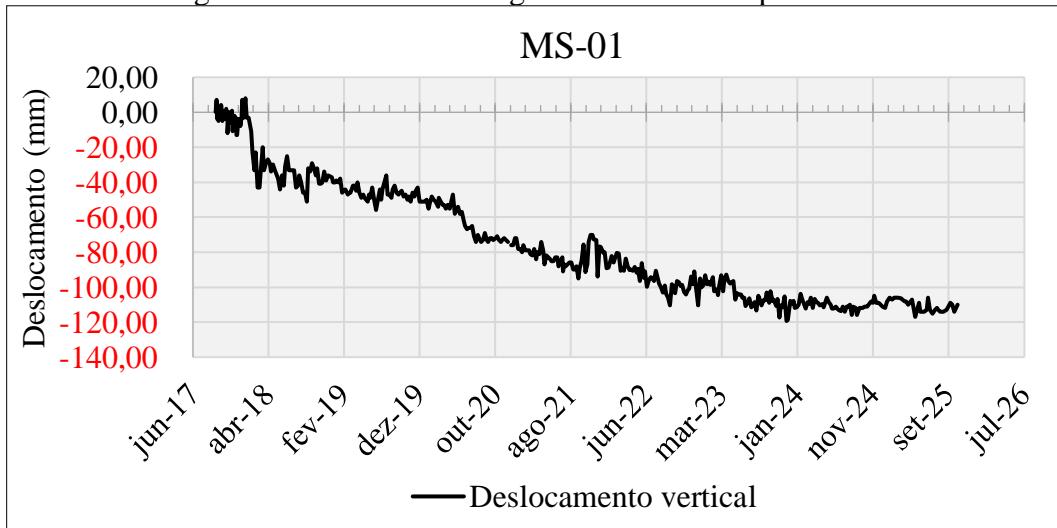


Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

Os registros do marco superficial instalado na seção estudo (MS-01) evidenciam um comportamento típico de recalque ao longo do tempo, com recalque crescente nos primeiros anos de monitoramento e estabilização progressiva nos períodos mais recentes. Observa-se que, desde a instalação do instrumento em junho de 2017, o deslocamento acumulado atingiu aproximadamente -120 mm, com maior taxa de deformação registrada entre 2017 e 2021 (Figura 4.6).

A partir de meados de 2022, nota-se uma redução significativa no recalque, com pequenas oscilações, indicando que o solo sob o ponto de medição entrou em uma fase de acomodação e adensamento secundário. Essa estabilização é consistente com a expectativa para barragens de terra compactada, nas quais os recalques mais expressivos ocorrem nos primeiros anos após a construção ou o primeiro enchimento do reservatório.

Figura 4.6 - Gráfico dos registros do marco superficial 01



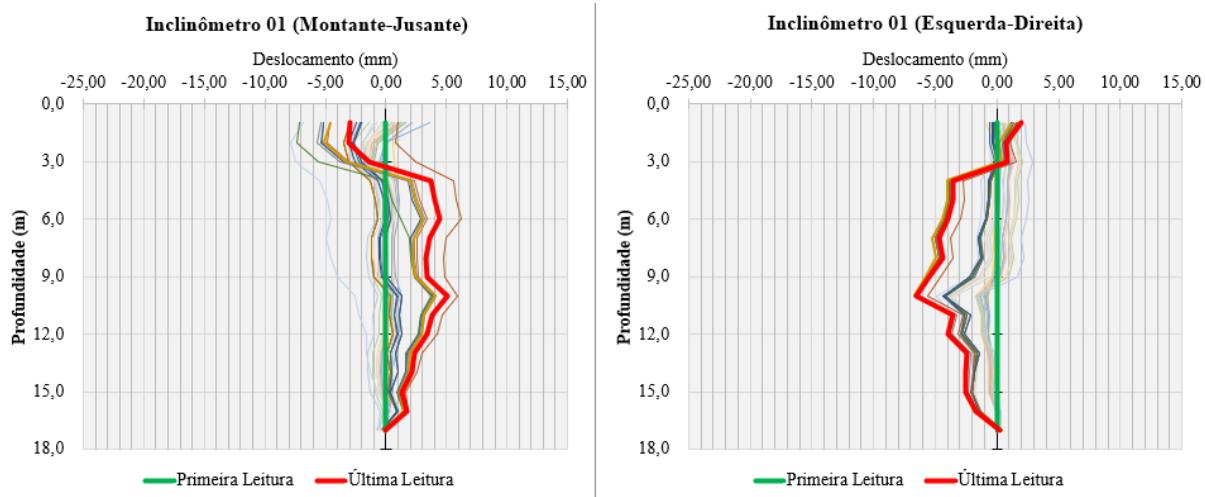
Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

A Figura 4.7 apresenta os gráficos de deslocamentos registrados pelo inclinômetro, sendo o gráfico da esquerda referente ao deslocamento no sentido montante-jusante e do da direita no sentido ombreira esquerda-ombreira direita. Os deslocamentos foram registrados ao longo do tempo, sendo a primeira leitura evidenciada pela linha verde e a última leitura pela linha vermelha).

No sentido montante-jusante, observa-se um deslocamento máximo em torno de 8 mm, com a maior deformação concentrada entre as cotas de 3 m e 15 m de profundidade, o que indica uma movimentação progressiva do corpo do maciço para a direção de jusante (sentido positivo). Esse comportamento é característico de movimentações lentas de acomodação, geralmente associadas a processos de adensamento e variações de poropressão. A continuidade da deformação ao longo do tempo, com deslocamentos bem distribuídos em profundidade, sugere que não há indicativos de formação de superfície de ruptura nítida.

Já o gráfico da direita, referente ao eixo esquerda-direita, revela deslocamentos laterais mais discretos, com valores máximos em torno de 7 mm, predominantemente superficiais (acima de 10 m de profundidade). A ausência de variações abruptas ou concentração de deslocamento sugere que as movimentações transversais estão associadas a deformações volumétricas pequenas, provavelmente ligadas à recalques diferenciais mínimos.

Figura 4.7 - Gráficos dos registros do inclinômetro 01



Fonte: Arquivo técnico, empresa não identificada (2025)

4.2 Calibração do modelo numérico

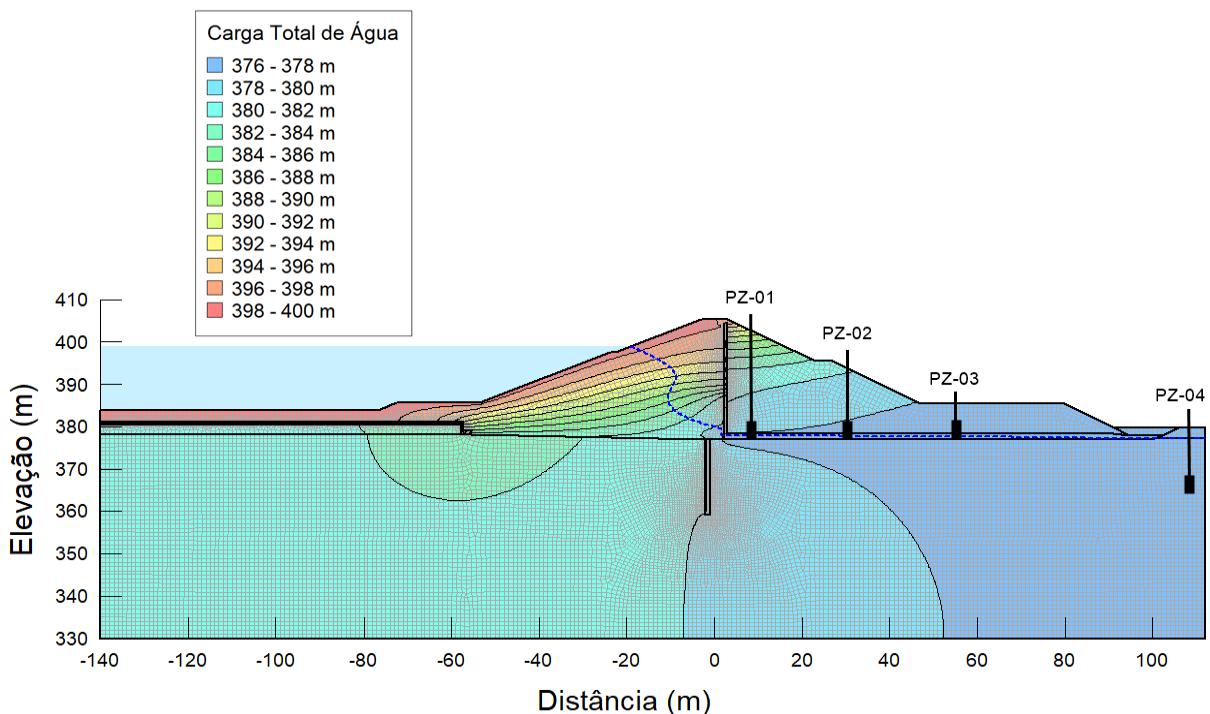
Para a calibração do modelo de fluxo no *SEEP/W*, foram conduzidas três simulações variando os parâmetros de anisotropia e a forma de representação da condutividade hidráulica dos materiais. O objetivo foi identificar a configuração que melhor reproduzisse os níveis piezométricos medidos em campo, por meio da comparação dos valores de carga total simulados com os registros dos piezômetros PZ01 ao PZ04, localizados na seção de estudo.

Na primeira simulação, os materiais foram modelados como saturado/não-saturado, adotando-se funções de condutividade hidráulica variável, ou seja, dependentes da sucção e do grau de saturação do solo. Foram utilizadas, para isso, as curvas características disponíveis na biblioteca do *SEEP/W*, selecionadas com base na similaridade com os tipos de solo identificados no projeto. Essas curvas representam o comportamento típico de solos arenosos, silto-argilosos e argilosos.

A anisotropia do aterro foi definida com uma razão $K_h=1,5K_v$, a fim de representar a maior facilidade de fluxo na direção horizontal, característica comum em solos compactados. Apesar disso, os resultados indicaram que os valores simulados foram consistentemente inferiores aos medidos em campo, com diferenças que variaram de 0,32 m (PZ02) a 1,36 m (PZ03), conforme apresentado na Tabela 4.2. A Figura 4.8 ilustra o campo de carga total simulado. A escolha de uma razão de anisotropia relativamente baixa pode ter limitado a representação do fluxo predominante na estrutura, contribuindo para os desvios observados entre os valores simulados e os registrados na instrumentação.

Diante da discrepância observada entre os valores simulados e os dados da instrumentação, identificou-se a necessidade de revisar os parâmetros adotados no modelo numérico, sendo assim, optou-se por simplificar a formulação hidráulica, adotando-se uma função de condutividade constante, característica de materiais saturados, com o objetivo de isolar os efeitos da anisotropia na calibração do modelo. Essas modificações foram adotadas para a Simulação 02.

Figura 4.8 – Simulação 01 com anisotropia do aterro de $K_h=1,5K_v$ e função de condutividade hidráulica variável



Fonte: Autora (2025)

Tabela 4.2 – Valores de carga total obtidos na simulação 01

Instrumento	$K_h=1,5K_v$ e permeabilidade variável		
	Carga total (m)		
	Valor de campo	Simulação 01	Diferença
PZ01	378,25	377,88	0,37
PZ02	378,10	377,78	0,32
PZ03	376,30	377,66	-1,36
PZ04	376,19	377,31	-1,12

Fonte: Autora (2025)

Na Simulação 02, os materiais foram modelados como saturados, com função condutividade hidráulica constante, ou seja, com permeabilidade definida como valor fixo e independente da sucção. Essa abordagem simplificada permite avaliar o impacto exclusivo da

variação da anisotropia no comportamento do fluxo, desconsiderando os efeitos de variações no grau de saturação.

A razão de anisotropia foi aumentada para $K_h=2,0K_v$, com o objetivo de permitir maior mobilidade da água na direção horizontal e, consequentemente, uma melhor representação do gradiente hidráulico observado em campo. Os resultados demonstraram melhora significativa na calibração, com diferenças entre os valores simulados e medidos variando de -0,05 m (PZ02) a 0,50 m (PZ03), conforme a Tabela 4.3. A Figura 4.9 apresenta a distribuição do campo de carga total obtido.

Ainda que os resultados tenham se aproximado dos valores registrados na instrumentação, a adoção da função constante resultou em limitações na representação de zonas parcialmente saturadas e em transições entre materiais distintos.

Embora a Simulação 02 tenha apresentado melhora em relação à anterior, os desvios observados em pontos específicos da instrumentação, sobretudo em zonas de transição entre materiais de diferentes características hidráulicas, evidenciaram limitações na adoção da função de condutividade hidráulica constante. Essa abordagem, ao considerar os materiais como integralmente saturados, desconsidera a influência do grau de saturação na condutividade, o que pode comprometer a representação do fluxo em regiões parcialmente saturadas do maciço.

Assim, optou-se por reintroduzir a modelagem do tipo saturado/não-saturado, por meio da função condutividade hidráulica variável, mantendo-se a razão de $K_h=2,0K_v$, que já havia se mostrado mais representativa. Essa nova configuração resultou na Simulação 03, cujo objetivo foi combinar a adequada representação do fluxo horizontal com uma formulação mais realista do comportamento hidráulico não saturado dos materiais.

Figura 4.9 – Simulação 02 com $K_h=2,0K_v$ e função de condutividade hidráulica constante

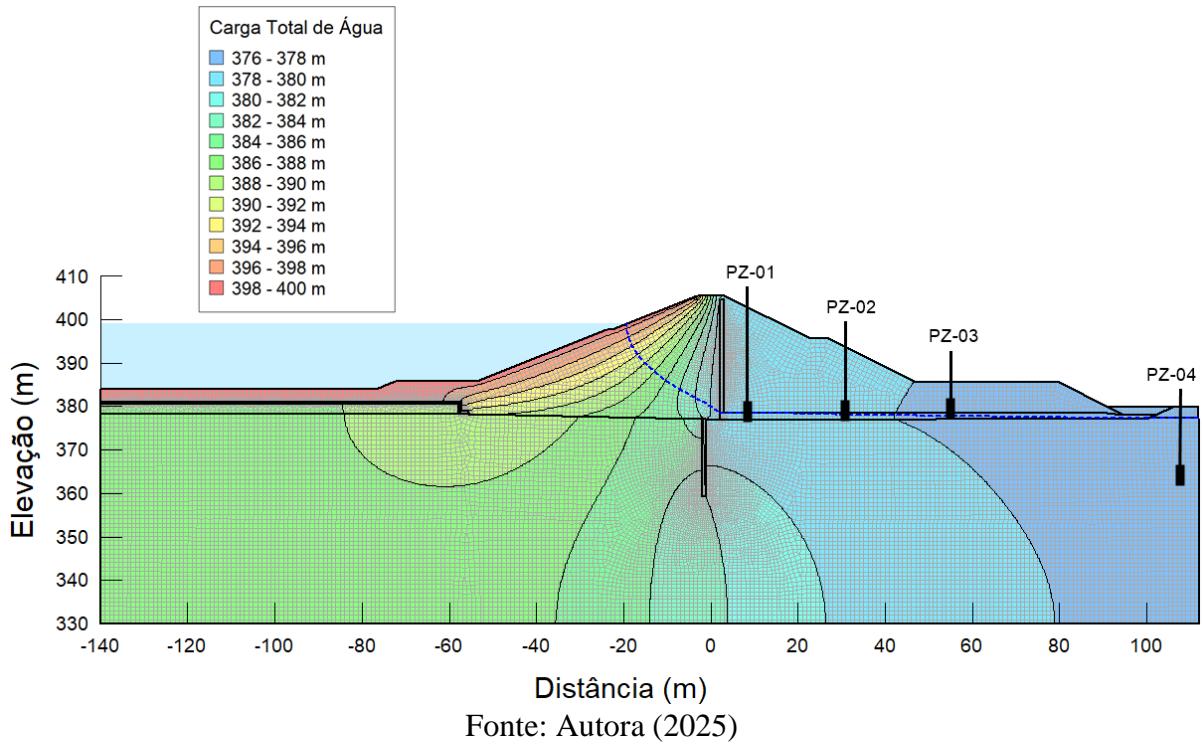


Tabela 4.3 - Valores de carga total obtidos na simulação 02

$K_h=2,0K_v$ e permeabilidade constante			
Instrumento	Carga total (m)		
	Valor de campo	Simulação 02	Diferença
PZ01	378,25	378,44	-0,19
PZ02	378,10	378,15	-0,05
PZ03	376,30	376,80	0,50
PZ04	376,19	376,46	-0,27

Fonte: Autora (2025)

Na Simulação 03, os materiais foram novamente modelados como saturado/não-saturado, com uso de função condutividade hidráulica variável, selecionada a partir das curvas características disponíveis na biblioteca do *SEEP/W*, compatíveis com os tipos de solo identificados no projeto. Essa abordagem permite que a condutividade hidráulica varie de acordo com a succão, possibilitando uma representação mais fiel do fluxo em zonas parcialmente saturadas.

A razão de anisotropia foi mantida em $K_h=2,0K_v$, o que, associado à modelagem não saturada, resultou em uma boa concordância com os dados obtidos em campo. As diferenças entre os valores simulados e medidos foram inferiores a 0,1 m em todos os piezômetros, com erro máximo de 0,08 m (PZ04), conforme demonstrado na Tabela 4.4.

A Figura 4.10 apresenta o campo de carga total correspondente, evidenciando coerência com os níveis piezométricos registrados. Essa configuração foi, portanto, adotada como modelo calibrado para as análises subsequentes de fluxo e estabilidade, por refletir de forma mais precisa as condições reais de percolação na barragem estudada.

Figura 4.10 - Simulação 03 com $K_h=2,0K_v$ e função de condutividade hidráulica variável

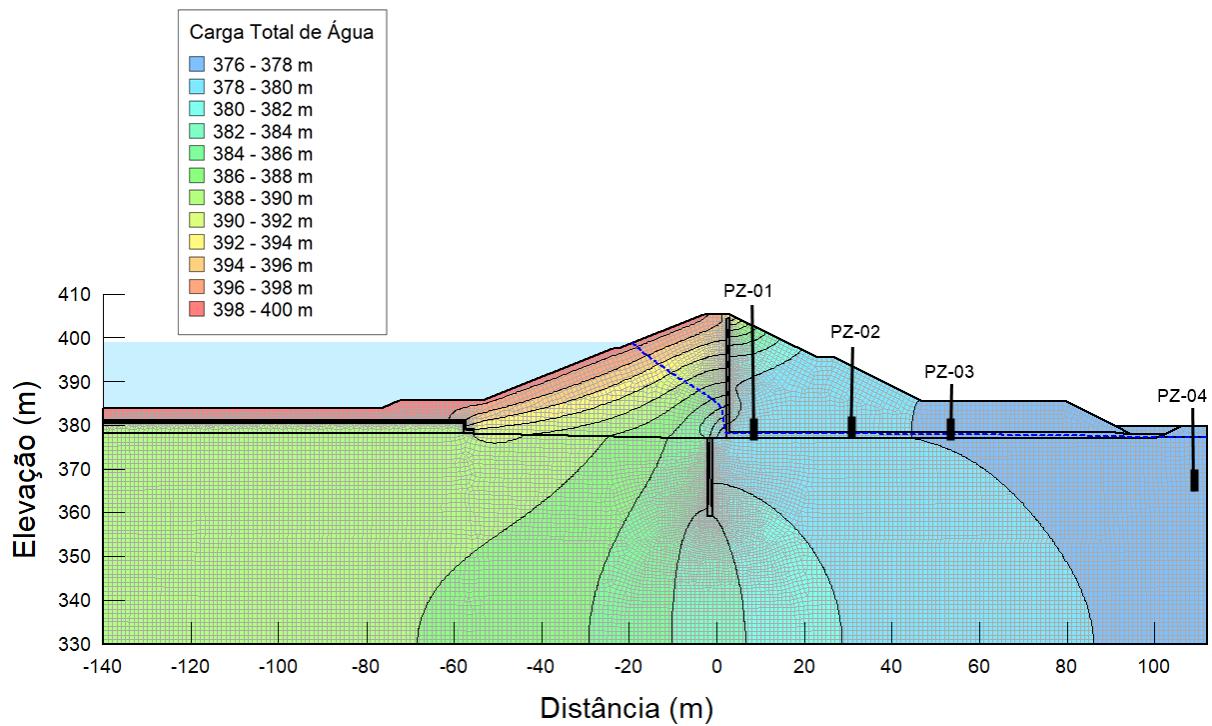


Tabela 4.4 - Valores de carga total obtidos na simulação 03

$K_h=2,0K_v$ e permeabilidade variável			
Instrumento	Carga Total (m)		
	Valor de campo	Simulação 03	Diferença
PZ01	378,25	378,23	0,02
PZ02	378,10	378,11	0,01
PZ03	376,30	376,32	-0,02
PZ04	376,19	376,11	-0,08

Fonte: Autora (2025)

4.3 Análise paramétrica da seção estudo

Com o objetivo de avaliar a influência de diferentes dispositivos de vedação e drenagem na resposta hidráulica e na estabilidade da barragem de terra em estudo, foi conduzida uma análise paramétrica da seção representativa, por meio de modelagens numéricas em regime permanente e de rebaixamento rápido. A análise considerou variações na configuração dos

elementos de controle de percolação, permitindo a comparação entre seis diferentes cenários, conforme descrito a seguir:

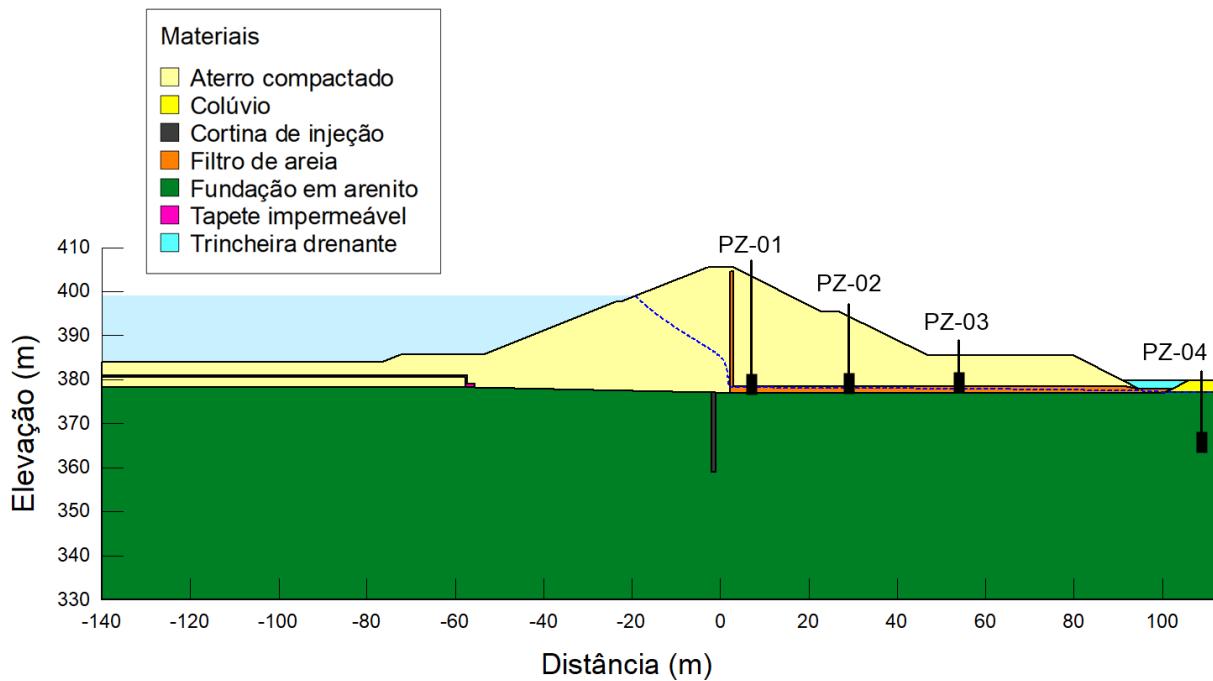
- Caso 01 – Situação com dois sistemas de vedação (tapete impermeável e cortina de injeção) associados a um sistema de drenagem (filtro interno);
- Caso 02 – Situação sem dispositivos de vedação, com presença apenas do filtro interno como sistema de drenagem;
- Caso 03 – Situação sem dispositivos de drenagem, com presença apenas dos sistemas de vedação (tapete impermeável e cortina de injeção);
- Caso 04 – Situação com cortina de injeção como único sistema de vedação, associada ao filtro interno como sistema de drenagem;
- Caso 05 – Situação com tapete impermeável como único sistema de vedação, associado ao filtro interno como sistema de drenagem;
- Caso 06 – Situação sem qualquer dispositivo de vedação ou drenagem.

Os modelos foram desenvolvidos utilizando os módulos *SEEP/W* e *SLOPE/W* do *software Geostudio 2024*, permitindo a obtenção de grandezas como carga total, poropressão e fator de segurança dos taludes para cada situação simulada. A metodologia adotada possibilitou identificar, de forma sistemática, a contribuição individual e combinada de cada elemento para o desempenho global da estrutura. Os resultados obtidos para cada caso são apresentados nos subtópicos seguintes.

4.3.1 Caso 01 – Situação com dois sistemas de vedação associados à drenagem

Para o primeiro cenário, foi analisado o desempenho hidráulico e geotécnico da barragem considerando a presença simultânea de dois sistemas de vedação (tapete impermeável e cortina de injeção) associados a um filtro de drenagem instalado na jusante (Figura 4.11).

Figura 4.11 – Seção modelada para o caso 01 do estudo



Fonte: Autora (2025)

Através dos módulos SEEP/W e SLOPE/W do *Geostudio 2024*, foi realizada a simulação de carga total, poropressão e estabilidade dos taludes do barramento, considerando um regime permanente de operação do reservatório. Adicionalmente, foi analisado o cenário crítico de rebaixamento rápido, também considerando a carga total e fatores de segurança para esta situação.

4.3.1.1 Regime permanente – Caso 01

A Figura 4.12 apresenta a distribuição da carga total da água ao longo da seção da barragem e os vetores de fluxo em três regiões críticas: tapete impermeável (Detalhe 01), filtro (Detalhe 02) e cortina de injeção (Detalhe 03). A observação detalhada dos vetores de fluxo nas regiões de interesse permite avaliar a atuação pontual e integrada dos dispositivos adotados.

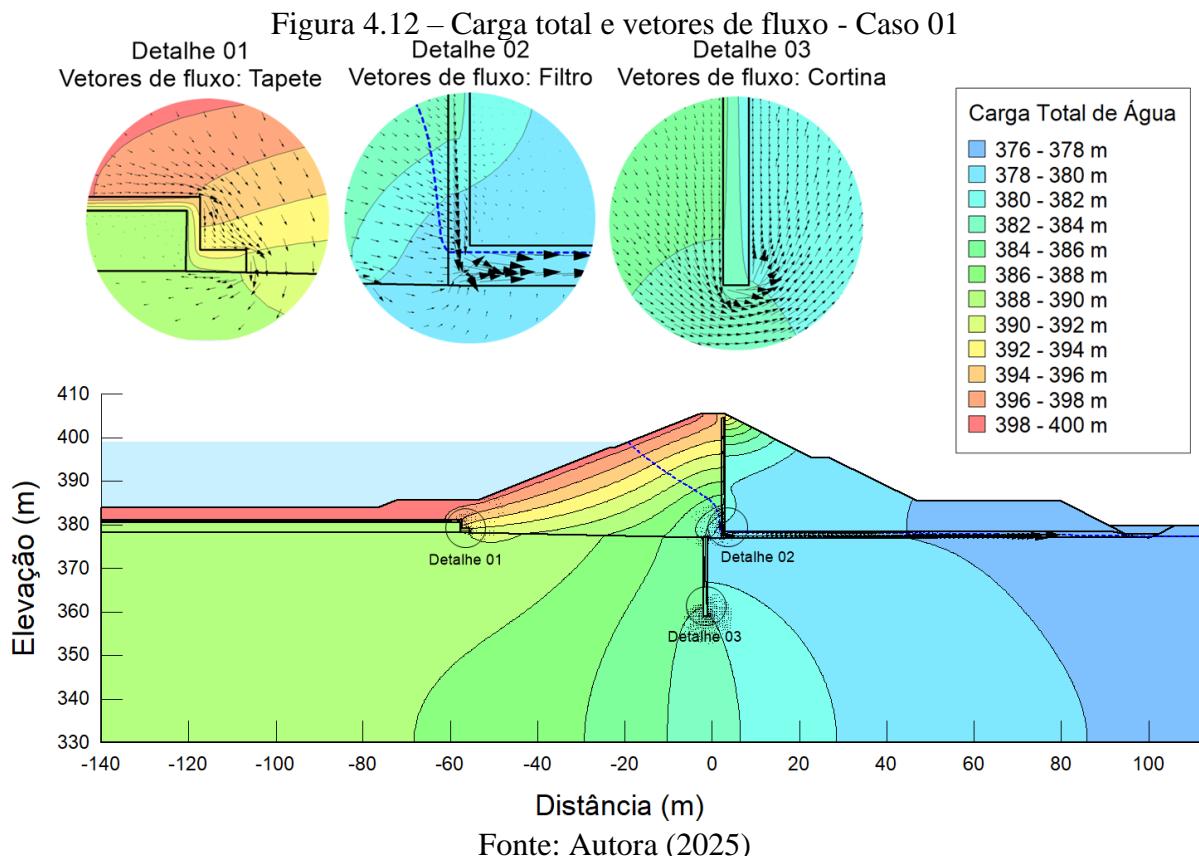
No Detalhe 01, correspondente ao trecho onde está instalado o tapete impermeável, os vetores de fluxo mostram uma nítida deflexão em direção horizontal. Esse comportamento evidencia que o tapete atua de forma eficaz no alongamento do caminho de percolação. Em vez de permitir a entrada direta de água no corpo do aterro pela base do talude de montante, o tapete obriga o fluxo a seguir por um trajeto mais extenso e raso, o que resulta na redução do gradiente hidráulico vertical. Essa condição é desejável, pois limita a ascensão da linha de saturação no interior do maciço e reduz significativamente os riscos de instabilidade por erosão interna.

No Detalhe 02, que corresponde à região de atuação do filtro interno de drenagem, os vetores convergem de forma clara e direta para o interior do filtro. Este padrão de escoamento indica que o filtro cumpre sua função de forma eficiente, captando e conduzindo a água que atravessa o maciço de jusante. A direção inclinada e descendente dos vetores sugere que o filtro atua como zona de alívio de poropressões, promovendo a dissipação das pressões neutras que se acumulam no corpo da barragem.

Por fim, no Detalhe 03, observa-se o comportamento do fluxo em torno da cortina de injeção instalada na fundação. Os vetores de fluxo mostram um padrão característico de desvio: ao atingirem a barreira imposta pela cortina, os vetores são reorientados. Essa alteração na trajetória do fluxo demonstra que a cortina de injeção atua como uma barreira profunda eficaz, redirecionando o escoamento para zonas onde há dispositivos de drenagem atuantes.

Esse mecanismo de contenção profunda é particularmente relevante em fundações com presença de materiais mais permeáveis, como o arenito da barragem estudo, pois evita a concentração de gradientes hidráulicos verticais que poderiam levar à instabilidade estrutural por erosão ou levantamento hidráulico.

O comportamento do fluxo se mostra coerente com o esperado para um sistema bem vedado e bem drenado, com as linhas equipotenciais espaçadas a jusante, indicando baixas velocidades de percolação e eficiência no rebaixamento da linha freática.



A Figura 4.13 apresenta a superfície crítica de ruptura identificada para o talude de jusante, destacada com hachuras verticais e cor verde, conforme convenção gráfica do *software*. A trajetória da superfície crítica inicia-se na base da berma de jusante, e percorre uma trajetória curvilínea ascendente, emergindo na crista da barragem, sem atingir a fundação nem o filtro. Trata-se, portanto, de um mecanismo de ruptura inteiramente contido no corpo do aterro, de profundidade intermediária.

O fator de segurança associado a essa superfície crítica foi de 1,91, valor superior ao mínimo de 1,50 estabelecido pela ABNT NBR 11682:2009 para condições estáticas. O resultado obtido indica que, a eficiência do sistema de drenagem interna, em especial o filtro de jusante, promove a dissipação da pressão neutra nas regiões mais suscetíveis à instabilidade. Isso contribui diretamente para a manutenção da resistência efetiva e para a estabilização do talude.

No que se refere ao talude de montante, ilustrado na Figura 4.14, a superfície de ruptura crítica é superficial e rasante, com início na porção média da face de montante e extensão limitada ao corpo superior do aterro. O fator de segurança obtido foi de 2,03, indicando uma condição de estabilidade muito satisfatória para o regime permanente. Esse comportamento pode ser atribuído à geometria com inclinação suave do talude de montante, associada à atuação do tapete impermeável, o qual restringe a infiltração de água a partir do reservatório.

Adicionalmente, a presença da lâmina d'água do reservatório contribui positivamente para a estabilidade do talude de montante ao atuar como contrapeso hidráulico. A pressão hidrostática exercida pela água do reservatório sobre a face externa do talude gera uma força que se opõe à possível movimentação da massa de solo, atuando no sentido de aumentar o fator de segurança. Esse efeito é particularmente significativo em condições de regime permanente, quando a linha d'água se mantém estabilizada, e foi descrito em diversos estudos clássicos, como Duncan, Wright e Wong (2014), que destacam a importância do equilíbrio hidrostático no reforço da estabilidade de estruturas de terra.

Figura 4.13 – Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 01

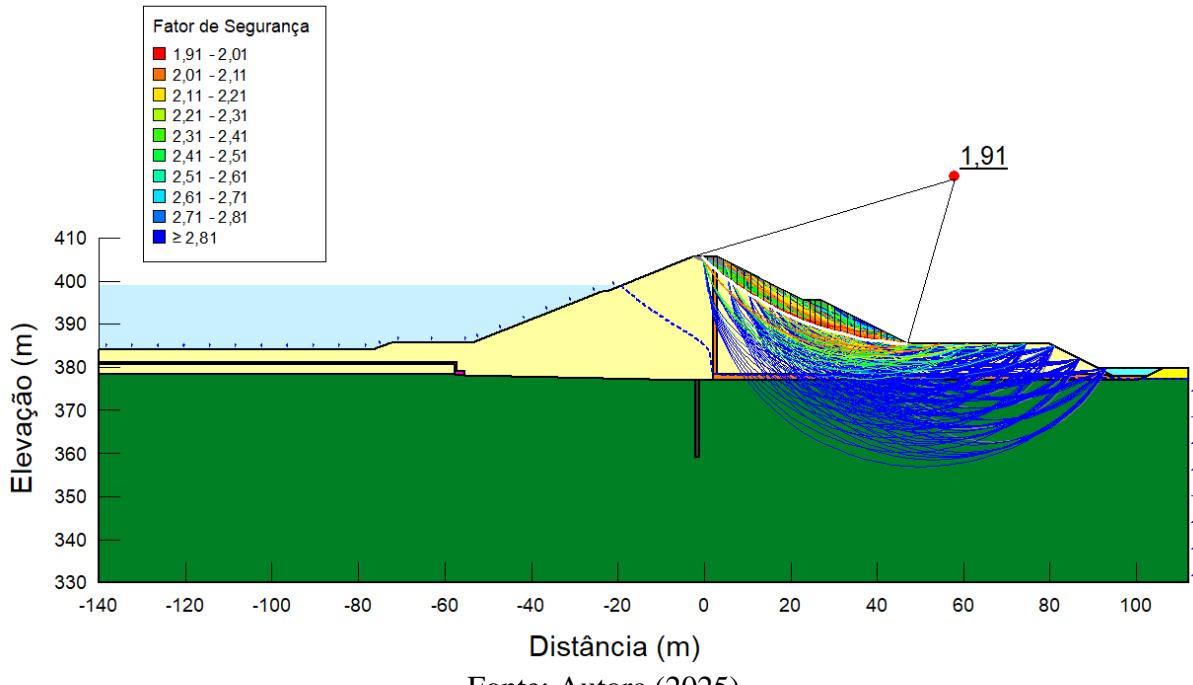
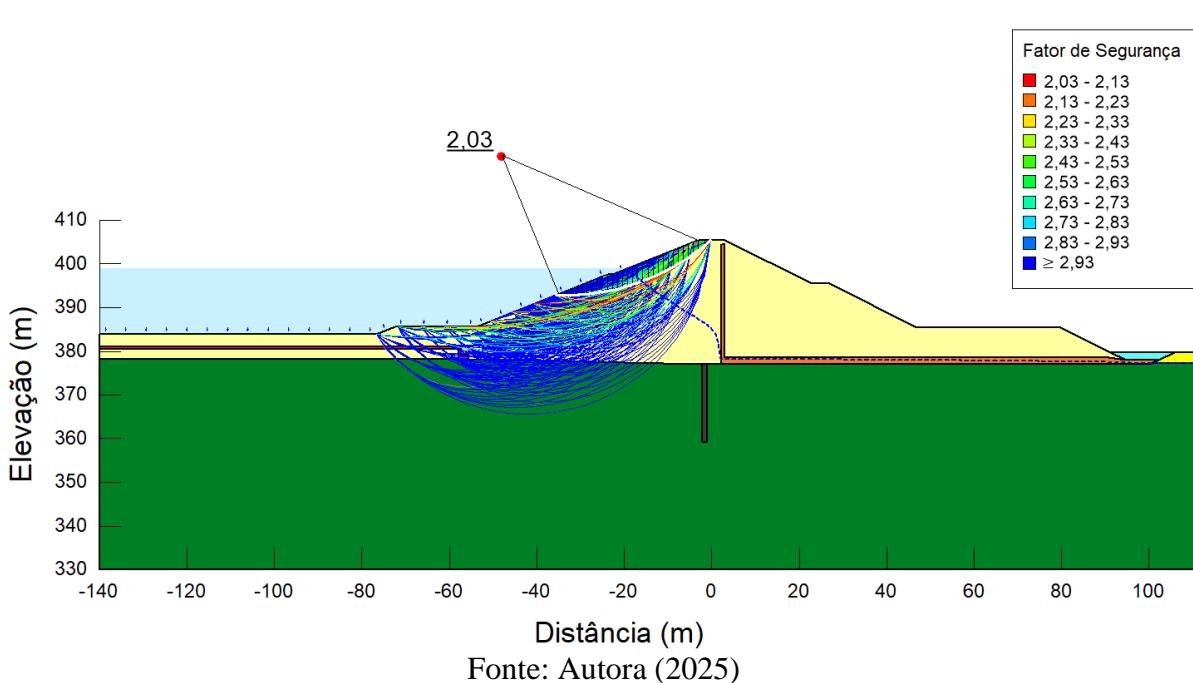


Figura 4.14 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 01



4.3.1.2 Rebaixamento rápido – Caso 01

A Figura 4.15 apresenta os resultados de distribuição da carga total da água e os vetores de fluxo no cenário de rebaixamento rápido para o Caso 01. Mesmo após a redução da lâmina

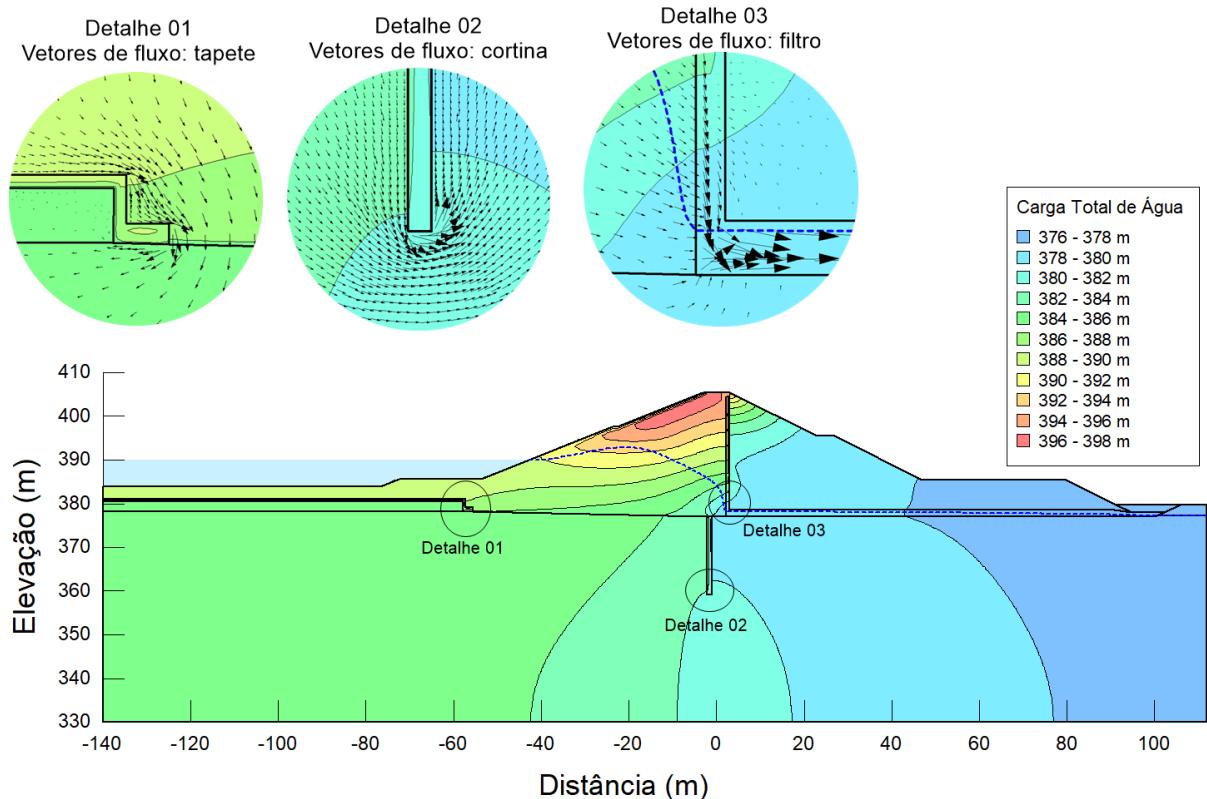
d'água do reservatório, observa-se que as linhas equipotenciais permanecem elevadas na região de montante, revelando uma condição de escoamento ainda ativa no interior do maciço. Tal comportamento está associado à baixa permeabilidade do aterro compactado, que limita a velocidade de dissipação da poropressão.

A análise dos vetores de fluxo, detalhada na Figura 4.15, evidencia que os dispositivos hidráulicos mantêm um comportamento similar ao verificado em regime permanente. O tapete impermeável continua a horizontalizar o escoamento, promovendo a extensão do caminho de percolação. A cortina de injeção impede o avanço vertical da percolação na fundação, forçando o redirecionamento do fluxo. Por fim, o filtro de jusante segue funcionando como uma zona de alívio hidráulico, com convergência de vetores para esta região.

Na situação de rebaixamento rápido, a redução súbita do nível do reservatório não é acompanhada por uma resposta imediata do regime de drenagem interna, e o solo compactado não tem tempo hábil para ajustar seu volume por dissipação de água. O resultado é uma condição em que as tensões efetivas são significativamente reduzidas, promovendo instabilidade potencial.

Do ponto de vista mecânico, o estado adensado não drenado corresponde à condição em que o maciço, apesar da remoção da carga externa, mantém seu volume praticamente constante em função da baixa permeabilidade e da rápida variação de carregamento. Segundo a teoria clássica da consolidação de Terzaghi, essa é uma fase inicial do processo de adensamento, durante a qual a poropressão assumida pelo fluido intersticial é máxima, e a resistência ao cisalhamento do solo depende exclusivamente da resistência não drenada (CU).

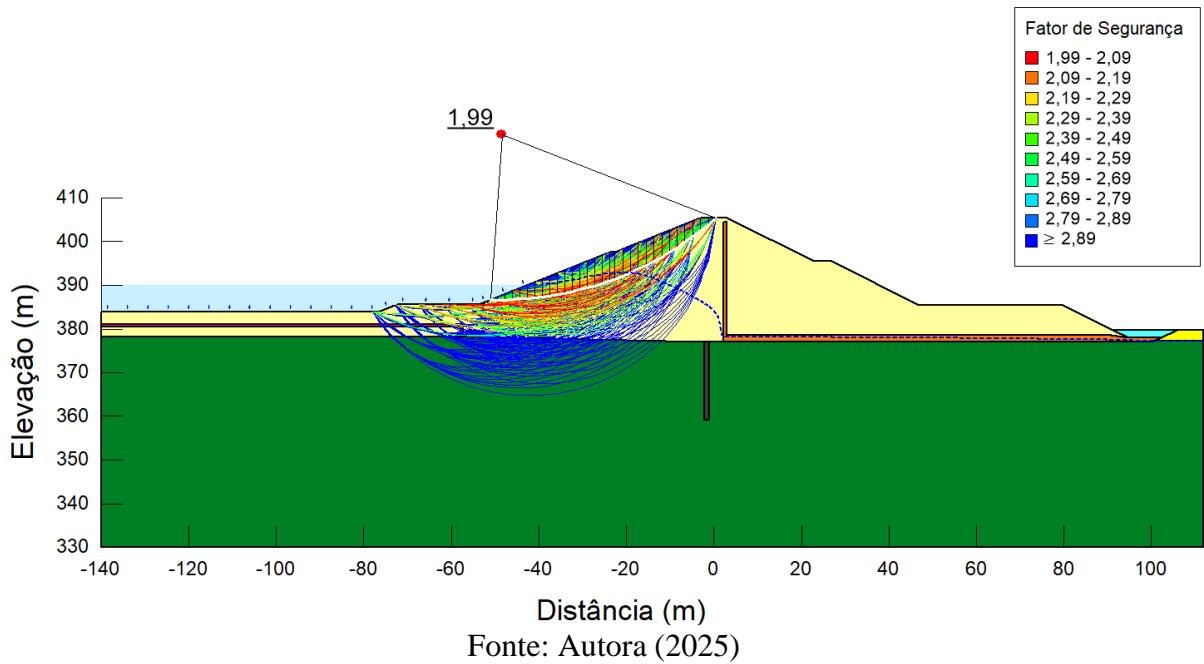
Figura 4.15 – Carga total no rebaixamento rápido – Caso 01



Fonte: Autora (2025)

A Figura 4.16 mostra a análise de estabilidade do talude de montante, na qual a superfície crítica de ruptura assume forma similar ao apresentado no regime permanente, porém mais profunda. O fator de segurança calculado foi de 1,99, inferior ao valor de 2,03 obtido em regime permanente, evidenciando a influência adversa do rebaixamento rápido. A redução do FS pode ser atribuída à não dissipação das poropressões em tempo útil e à eliminação da carga estabilizante externa, ou seja, da pressão hidrostática exercida pelo reservatório, que anteriormente atuava como força passiva sobre a face de montante.

Figura 4.16 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 01



A configuração analisada no Caso 01, composta por tapete impermeável, cortina de injeção e filtro interno de drenagem, apresentou comportamento hidráulico e geotécnico satisfatório sob as condições de regime permanente e rebaixamento rápido. Os resultados indicaram controle eficaz da percolação, com adequada atuação dos dispositivos de vedação e drenagem, e fatores de segurança superiores aos limites mínimos recomendados pela ABNT NBR 11682:2009, conforme demonstrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Fatores de segurança obtidos para o Caso 01

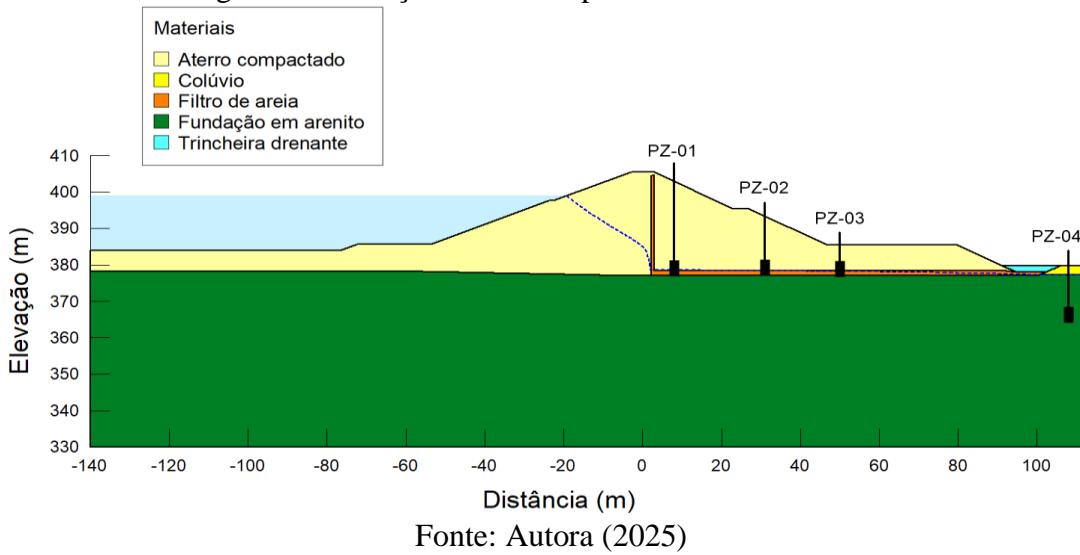
Caso	Configuração	Fator de segurança (FS)		
		Regime Permanente		Rebaixamento rápido
		Montante	Jusante	Montante
1	Tapete + Cortina de injeção + Filtro	2,03	1,91	1,99

Fonte: Autora (2025)

4.3.2 Caso 02 – Situação com somente drenagem

A Figura 4.17 ilustra a geometria modelada para o Caso 02, correspondente ao cenário em que a barragem foi simulada apenas com elementos de drenagem. Nesta configuração, buscou-se avaliar o desempenho isolado do sistema de drenagem na condução do fluxo e na contenção das pressões neutras no interior do maciço.

Figura 4.17 - Seção modelada para o caso 02 do estudo.



Fonte: Autora (2025)

4.3.2.1 Regime permanente – Caso 02

A Figura 4.18 apresenta a distribuição da carga total de água simulada para o Caso 02, o qual considera a presença apenas de dispositivos de drenagem. Embora as propriedades hidráulicas da fundação e do maciço permaneçam inalteradas entre os cenários, observa-se um comportamento substancialmente distinto no regime de fluxo e na configuração das linhas equipotenciais.

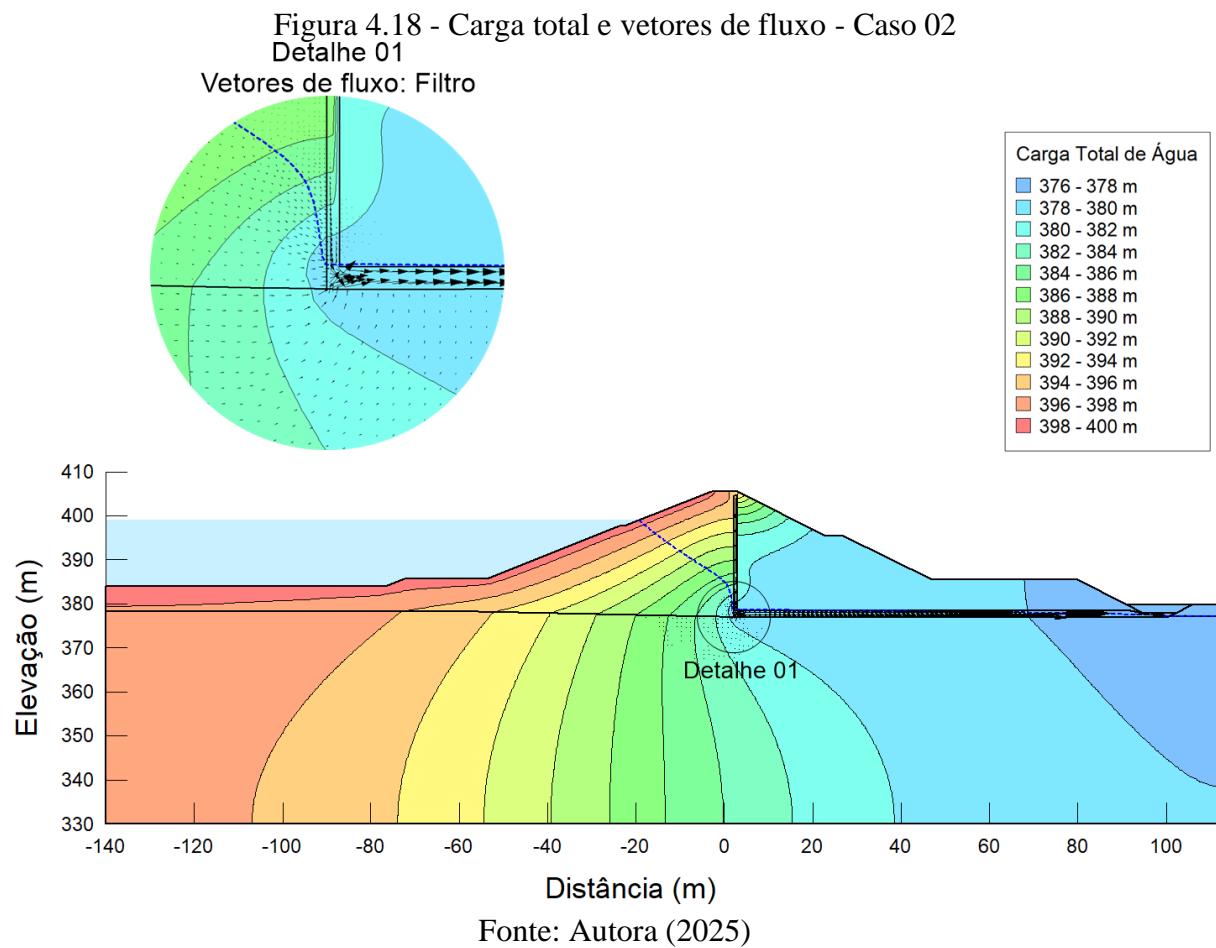
No Caso 01 (Figura 4.12), o tapete impermeável implantado na base do talude de montante exerceu papel determinante na contenção da percolação vertical, promovendo o redirecionamento do fluxo para as camadas mais superficiais do maciço. Em contraste, no Caso 02, a remoção do tapete permitiu a infiltração direta da água proveniente do reservatório para o interior da fundação.

Essa alteração promoveu um avanço significativo das linhas de carga total em profundidade, com faixas entre 390 e 398 m atingindo a interface entre o aterro compactado e a fundação em arenito. Como consequência, as equipotenciais passaram a apresentar maior espaçamento e orientação predominantemente vertical na região central da fundação, indicando acúmulo de energia hidráulica em camadas profundas.

A comparação entre os dois cenários evidencia que a ausência do tapete impermeável foi o principal fator responsável pela elevação da carga total na fundação, ainda que os demais parâmetros hidráulicos tenham sido mantidos constantes. A atuação isolada dos dispositivos de drenagem no Caso 02, mostrou-se eficiente no direcionamento do fluxo em direção à jusante, porém mantendo a carga na região de montante mais elevada. A ausência da cortina de injeção

também contribuiu para a elevação da carga, sobretudo na porção de jusante da fundação, mas seu efeito foi secundário em relação ao impacto provocado pela retirada do tapete.

De forma geral, os resultados do Caso 02 indicam um comportamento hidráulico menos eficiente que o observado no Caso 01, com elevação significativa da carga total nas zonas profundas e alteração expressiva na distribuição das equipotenciais. Esses aspectos reforçam a importância da presença de barreiras impermeáveis na redução dos gradientes verticais e no controle da percolação em fundações de barragens de terra.



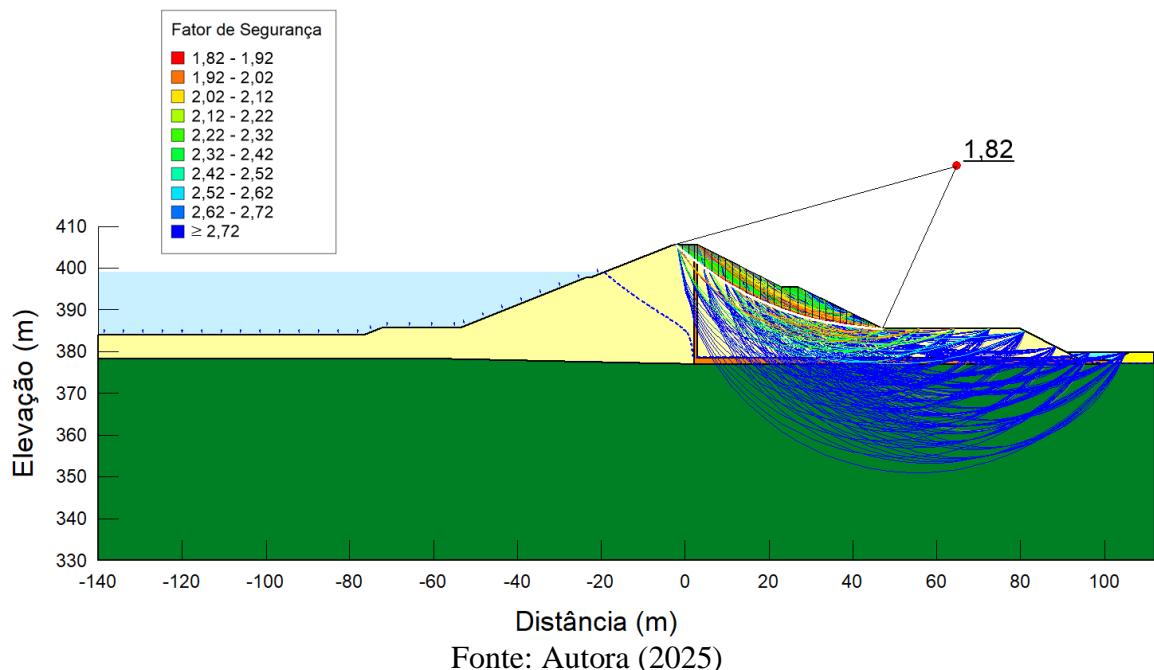
A Figura 4.19 apresenta a superfície crítica de ruptura identificada para o talude de jusante no Caso 02, representada com hachuras verticais e coloração verde. A superfície tem início na crista, percorre uma trajetória curvilínea descendente e emerge na base da berma de jusante, cortando parcialmente a região do filtro de areia. Trata-se de uma superfície de ruptura de profundidade intermediária, que atravessa parte significativa do corpo do aterro, sem, no entanto, alcançar a fundação.

O fator de segurança associado a essa superfície crítica foi de 1,82, valor superior ao mínimo de 1,50 recomendado pela ABNT NBR 11682:2009 para condições de estabilidade em regime estático. O resultado demonstra que, mesmo na ausência de dispositivos de vedação, o

sistema de drenagem é eficaz em manter os níveis de poropressão controlados, particularmente na região de jusante, onde o fluxo é captado pelo filtro e conduzido à trincheira drenante.

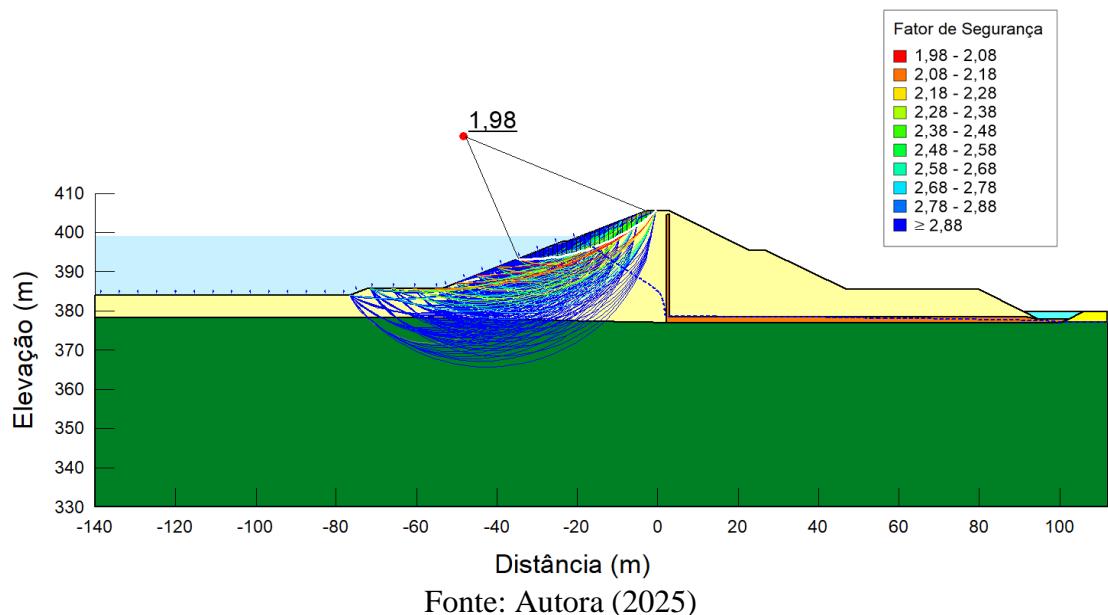
No que se refere ao talude de montante, ilustrado na Figura 4.20, a superfície crítica de ruptura apresenta-se mais profunda que no Caso 01, com trajetória iniciada na parte superior da face de montante e extensão superficial. O fator de segurança obtido para essa condição foi de 1,98, ainda acima do limite mínimo exigido, indicando condição estável, mas com redução de segurança relativa frente ao Caso 01.

Figura 4.19 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 02



Fonte: Autora (2025)

Figura 4.20 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 02



Fonte: Autora (2025)

4.3.2.2 Rebaixamento rápido – Caso 02

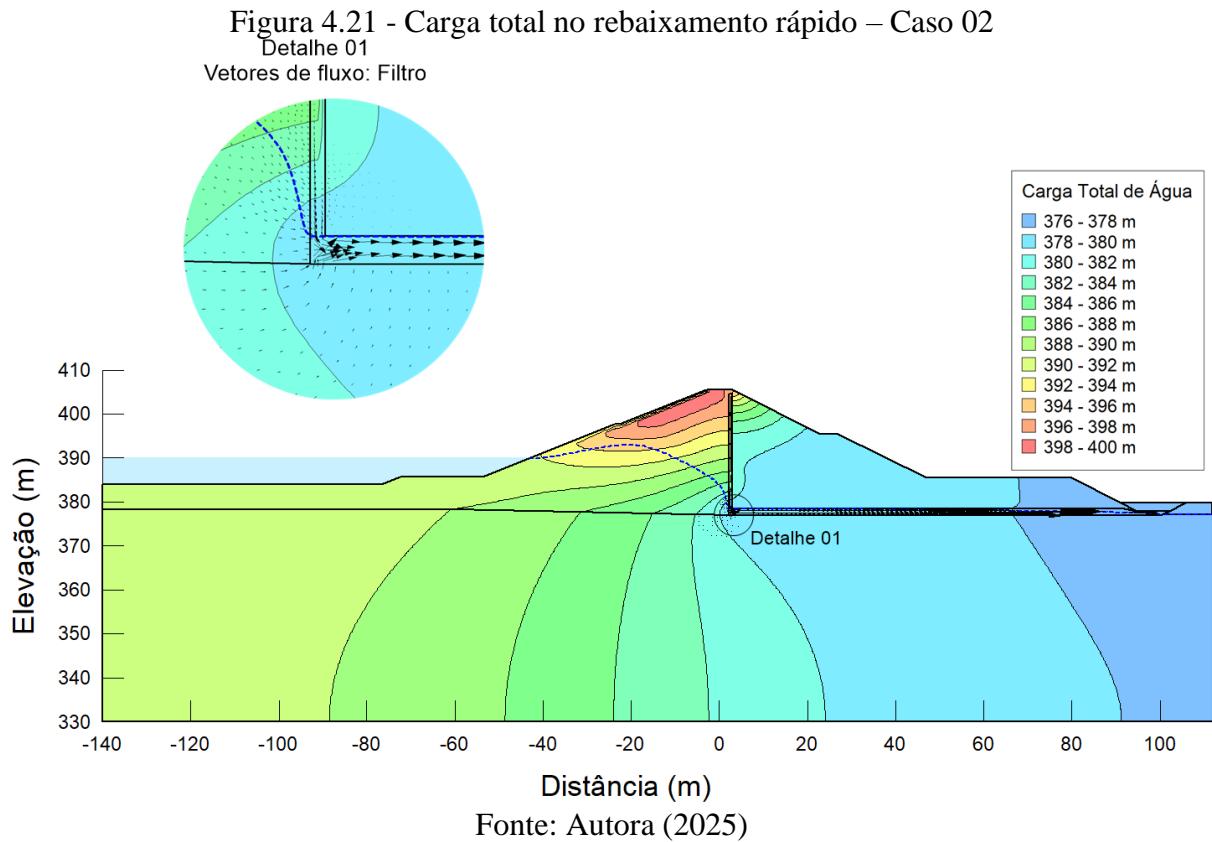
A Figura 4.21 ilustra a distribuição da carga total de água e os vetores de fluxo simulados para o Caso 02 no cenário de rebaixamento rápido do nível do reservatório. Observa-se que, mesmo após a redução da lâmina d'água, a carga total permaneceu elevada na região de montante. Essa manutenção de cargas elevadas indica uma resposta hidráulica ainda não dissipada, resultado da baixa permeabilidade do aterro compactado, que restringe a velocidade de redistribuição das pressões internas.

Comparativamente ao Caso 01, verifica-se que, no Caso 02, a carga total apresenta valores maiores ao longo da fundação, principalmente na região de montante. Tal comportamento decorre da ausência do tapete impermeável e da cortina de injeção, que, no Caso 01, atuavam como barreiras hidráulicas à propagação vertical e horizontal do fluxo. Enquanto no Caso 01 a carga total permanecia mais concentrada nas porções superiores e com gradientes suavizados, a Figura 4.21 mostra que, no Caso 02, as linhas equipotenciais atingem cotas mais baixas, resultando em maior armazenamento de energia hidráulica em profundidade.

Adicionalmente, o comportamento dos vetores de fluxo no detalhe 01 revela que, mesmo diante do rebaixamento, o filtro de areia continua promovendo o direcionamento do escoamento para jusante. No entanto, sem o redirecionamento horizontal promovido pelo tapete (como observado no Caso 01), os vetores de fluxo em montante têm um direcionamento mais vertical, concentrando o fluxo diretamente em direção à fundação.

Esse padrão indica um aumento da carga hidráulica atuante nas camadas mais profundas, condição que pode agravar a instabilidade do talude de montante, especialmente sob regime adensado não drenado. Ao contrário do Caso 01, em que a geometria da linha de carga era mais suavizada e horizontalizada, a configuração observada no Caso 02 implica gradientes verticais mais intensos e maior propagação do fluxo para a fundação.

Portanto, a Figura 4.21 evidencia que, no cenário de rebaixamento rápido, a ausência dos dispositivos de vedação no Caso 02 promove uma elevação mais profunda da carga total, uma verticalização acentuada do fluxo e uma maior dependência da drenagem interna para evitar acúmulo de pressão. Comparativamente ao Caso 01, isso representa uma condição menos favorável do ponto de vista hidráulico, ainda que a estabilidade global permaneça satisfatória.



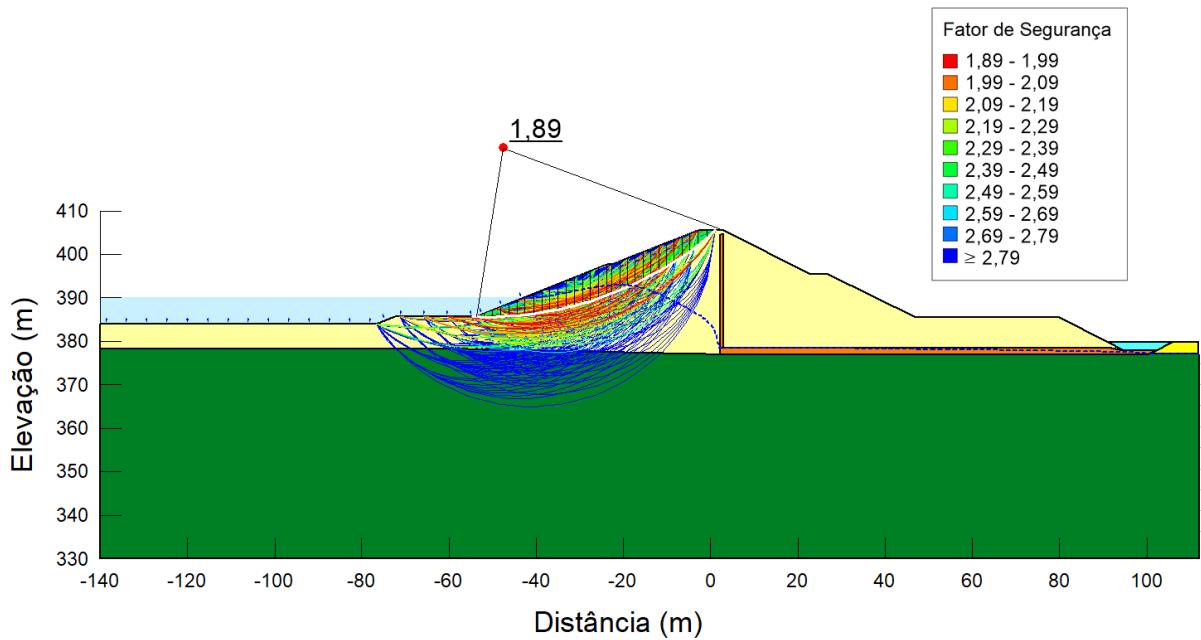
A Figura 4.22 apresenta a superfície crítica de ruptura identificada para o talude de montante no Caso 02, sob condição de rebaixamento rápido. O fator de segurança calculado para essa superfície foi de 1,89, valor superior ao mínimo de 1,50 estabelecido pela ABNT NBR 11682:2009 para condições estáticas, mas inferior aos obtidos em regime permanente.

A geometria da superfície de ruptura sugere um mecanismo típico de instabilidade associado ao regime adensado não drenado, o qual ocorre devido à dissipaçāo incompleta das poropressões internas logo após a retirada da lâmina d'água do reservatório. Nessa condição, o solo do talude de montante, ainda saturado, não tem tempo suficiente para liberar o excesso de pressão intersticial, mantendo-se em estado de baixa resistência efetiva.

Comparativamente ao Caso 01, a instabilidade no talude de montante é mais pronunciada no Caso 02. No cenário com vedação (Caso 01), a presença do tapete impermeável limitava a infiltração vertical da água e favorecia o redirecionamento horizontal do fluxo, promovendo uma condição mais favorável de redistribuição das cargas hidráulicas após o rebaixamento. Com isso, a superfície crítica de ruptura permanecia mais superficial, e o fator de segurança era superior. Já no Caso 02, a remoção do tapete e da cortina de injeção permite que a carga hidráulica se acumule em regiões profundas, deslocando a superfície crítica para uma zona de maior suscetibilidade e resultando em fator de segurança ligeiramente inferior.

Adicionalmente, a retirada da lâmina d'água do reservatório elimina o efeito estabilizador do contrapeso hidráulico, o qual, no regime permanente, contribuía para a contenção da massa de solo do talude de montante. Esse contrapeso hidrostático era particularmente eficaz no Caso 01, em razão da atuação conjunta com os dispositivos de vedação, que promoviam a contenção da energia hidráulica interna. No Caso 02, a ausência desses elementos reduz a capacidade do maciço em resistir ao colapso da face de montante após a remoção da pressão externa.

Figura 4.22 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 02



Fonte: Autora (2025)

De modo geral, no Caso 02, a retirada dos elementos de vedação resultou em maior propagação da carga hidráulica para a fundação, intensificação dos gradientes verticais e aprofundamento das superfícies críticas, especialmente no talude de montante sob rebaixamento rápido. Apesar disso, o sistema de drenagem foi eficaz em manter as poropressões controladas, assegurando a estabilidade global da estrutura, conforme fatores de segurança apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores obtidos para o Caso 02

Caso	Configuração	Fator de segurança (FS)		
		Regime permanente		Rebaixamento rápido
		Montante	Jusante	Montante
2	Tapete + Cortina de injeção + Filtro	1,98	1,82	1,89

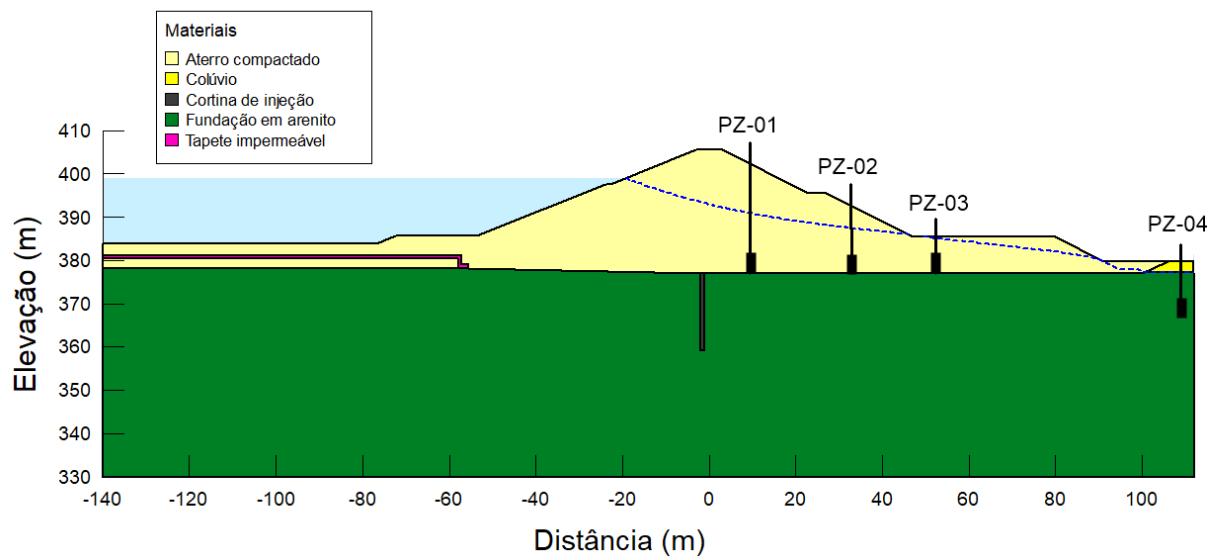
Fonte: Autora (2025)

Em síntese, realizando uma análise comparativa com o Caso 01, percebe-se que a presença do filtro contribui para a drenagem e alívio de pressões neutras, favorecendo um desempenho satisfatório da estrutura. No entanto, a ausência de dispositivos de vedação, compromete parcialmente o controle de percolação e resulta em condições hidráulicas menos favoráveis.

4.3.3 Caso 03 – Situação com somente vedação

A Figura 4.23 apresenta a configuração modelada para o Caso 03, que se caracteriza pela presença exclusiva de dispositivos de vedação, compostos por um tapete impermeável na região de montante e uma cortina de injeção na fundação. Nesta alternativa, não foram previstos dispositivos de drenagem, de modo a possibilitar a avaliação isolada da eficácia dos elementos de vedação no controle do fluxo subterrâneo.

Figura 4.23 - Seção modelada para o caso 03 do estudo.



4.3.3.1 Regime permanente – Caso 03

A Figura 4.24 apresenta a distribuição da carga total da água e os vetores de fluxo para o Caso 03, nesta observa-se que a linha piezométrica, permanece elevada ao longo de grande parte do corpo da barragem, sobretudo na região de jusante. Este comportamento evidencia a limitação dos dispositivos de vedação em promover a dissipação das pressões neutras quando não são acompanhados de elementos drenantes.

Do ponto de vista interpretativo, esta configuração pode ser analogamente compreendida como um cenário de colmatação do filtro interno, condição em que o sistema

drenante originalmente previsto na barragem perde sua eficiência por obstrução de seus vazios por finos do solo. Tal situação leva à perda da capacidade de drenagem e resulta no aumento da carga hidráulica interna, conforme modelado neste caso.

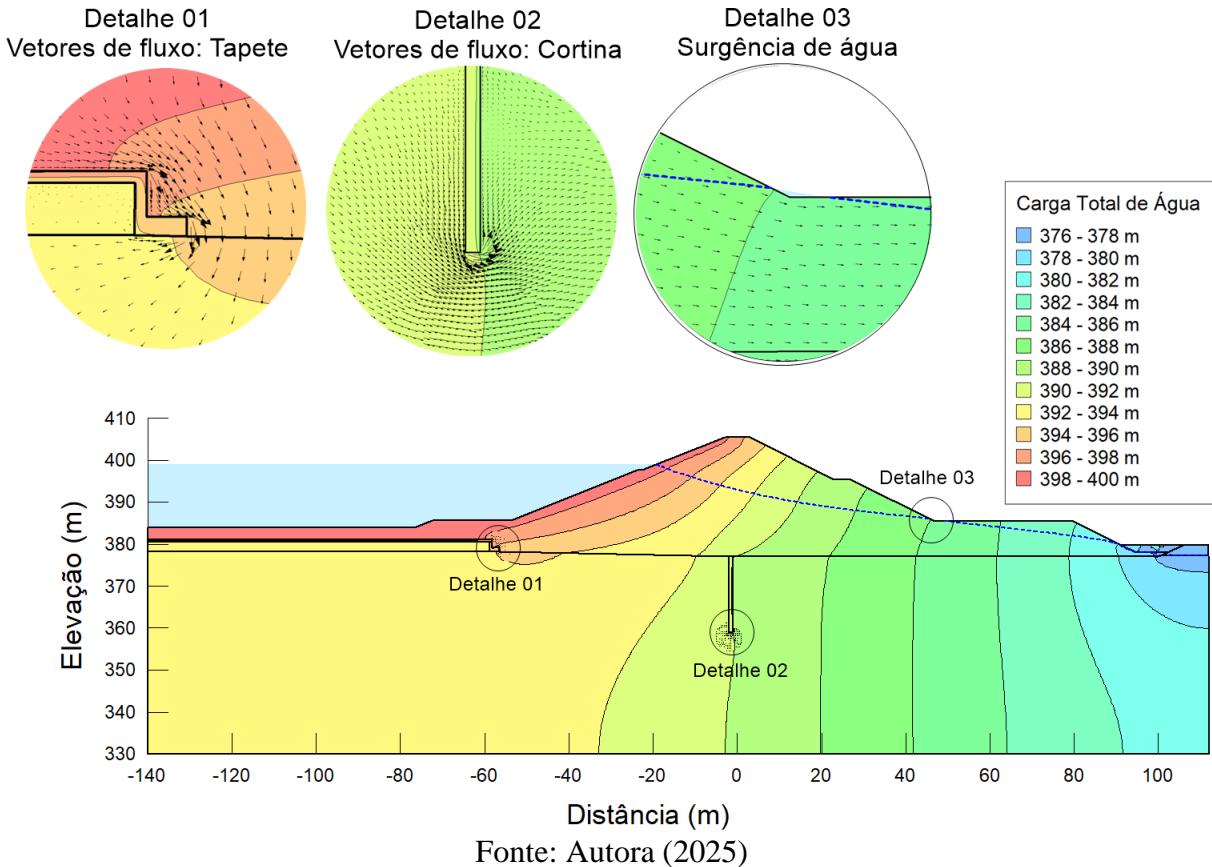
Os resultados indicam que, apesar da presença dos dispositivos de vedação, a ausência de elementos drenantes impede a dissipação eficiente da poropressão no interior do maciço, resultando em um regime de escoamento que tende à condição não drenada. Tal comportamento favorece o aumento dos esforços internos e a redução do fator de segurança.

Os Detalhes 01 e 02, presentes na Figura 4.24, evidenciam que os dispositivos de vedação continuam exercendo seu papel de contenção localizada do fluxo. No Detalhe 01, os vetores de fluxo são redirecionados lateralmente ao atingirem o tapete impermeável, o que confirma sua atuação como barreira horizontal eficaz. No Detalhe 02, observa-se um padrão radial dos vetores em torno da cortina de injeção, compatível com o funcionamento de uma barreira vertical. No entanto, mesmo com sua efetiva atuação local, esses dispositivos não são suficientes para rebaixar a carga hidráulica em todo o maciço, devido à inexistência de uma via drenante para o alívio da poropressão acumulada.

O Detalhe 03 destaca a região de jusante, onde ocorre a ascensão da linha piezométrica até próximo à superfície. Os vetores de fluxo nessa área indicam uma condição de urgência de água, situação que pode comprometer a estabilidade da barragem por meio de erosão interna (*piping*).

A comparação com os demais casos evidencia que o Caso 03 apresentou o pior desempenho hidráulico dentre os cenários simulados até o momento. O Caso 01, que combina vedação e drenagem, demonstrou ser a configuração mais eficiente, com significativa redução da carga total no interior do maciço e controle eficaz do escoamento. O Caso 02, apenas com sistema de drenagem, apresentou aumento de carga principalmente na região de montante, porém o filtro proporcionou rebaixamento gradual da linha de carga, diferente da situação apresentada no caso 03, em que a linha piezométrica permaneceu elevada.

Figura 4.24 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 03



A Figura 4.25 apresenta os resultados da análise de estabilidade do talude de jusante para o Caso 03, em condição de regime permanente, com destaque para a superfície de ruptura crítica e o fator de segurança associado. Essa condição foi modelada para representar também um cenário equivalente à colmatação completa de filtros, permitindo avaliar os efeitos da ausência de alívio hidráulico na estabilidade global da estrutura.

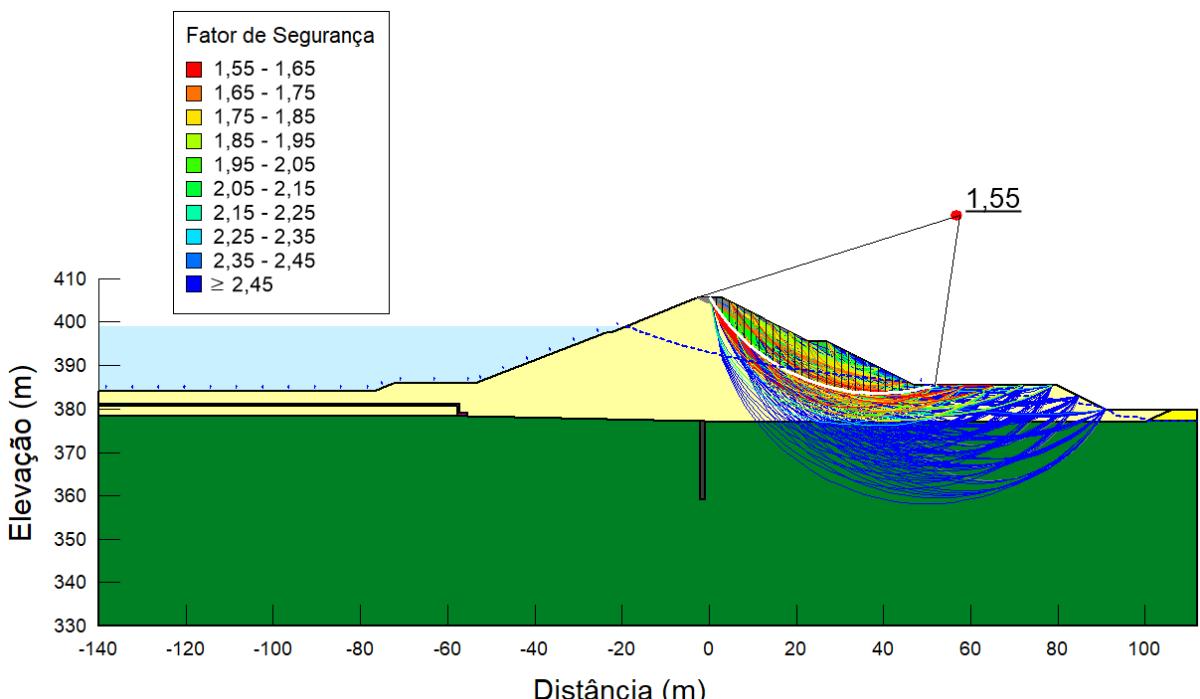
A análise revelou um fator de segurança mínimo de 1,55, valor apenas marginalmente superior ao critério de aceitação convencional para condições normais de operação ($FS \geq 1,5$). Embora o valor ainda indique estabilidade global, ele representa uma condição limite. A superfície de ruptura crítica intercepta o talude de jusante com trajetória profunda, atravessando boa parte do talude.

Destaca-se que, em comparação com os Casos 01 e 02, houve um aumento significativo na profundidade da superfície de ruptura, o que evidencia um maior envolvimento do maciço como um todo no mecanismo potencial de instabilidade. Este comportamento está diretamente associado à manutenção de poropressões elevadas no interior do aterro, resultado da ausência de dispositivos drenantes capazes de conduzir e aliviar o fluxo percolado. Com o aumento de carga, a resistência efetiva ao longo das superfícies potenciais de ruptura é reduzida,

favorecendo trajetórias críticas mais profundas e extensas. A surgência observada na região de jusante (Figura 4.24) intensifica essa condição ao gerar gradientes hidráulicos ascendentes que atuam desestabilizando o talude.

Nos casos anteriores, a geometria da ruptura foi menos profunda e mais restrita à porção superficial do talude, o que reflete a maior eficiência hidráulica proporcionada por sistemas de drenagem (Caso 02) e pela atuação sinérgica entre vedação e drenagem (Caso 01). O Caso 03, por sua vez, apresentou o cenário mais desfavorável até o momento, tanto em termos de poropressão quanto de geometria da superfície de ruptura e valor do fator de segurança.

Figura 4.25 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 03



Fonte: Autora (2025)

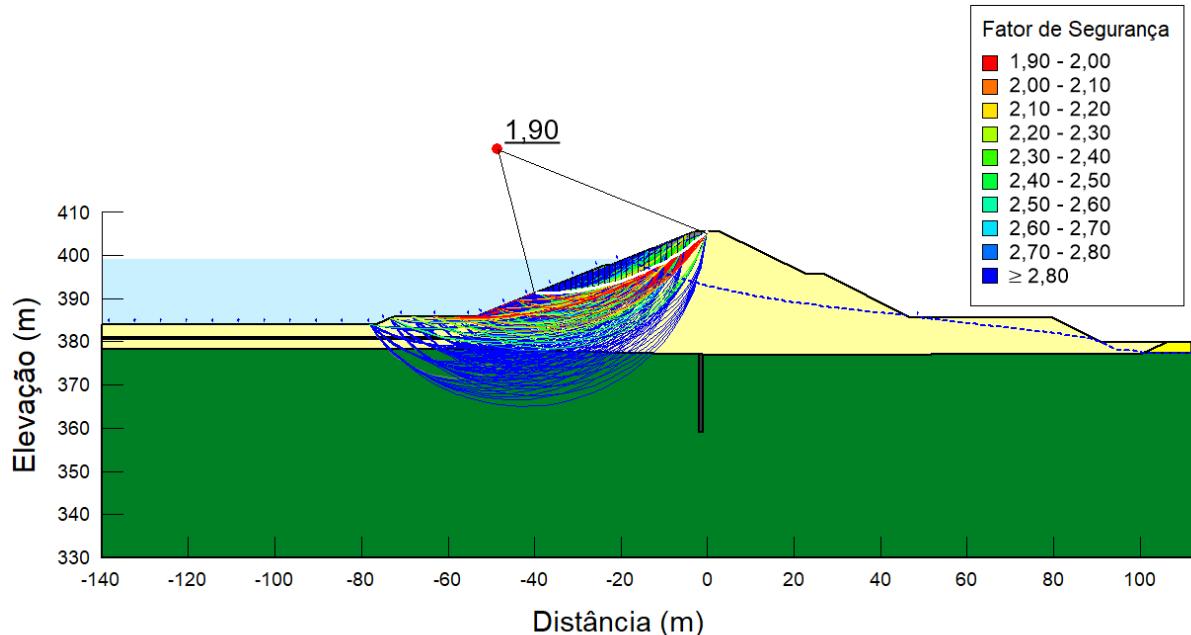
A Figura 4.26 apresenta a superfície de ruptura crítica obtida para o talude de montante da barragem no Caso 03, sob condição de regime permanente. O fator de segurança mínimo obtido para o talude de montante foi 1,90, valor consideravelmente superior ao limiar mínimo adotado em análises de estabilidade para condições permanentes ($FS \geq 1,5$). Esse resultado indica uma condição estrutural estável, com margem de segurança satisfatória. A superfície crítica de ruptura é superficial, menos profunda que aquela observada para o talude de jusante.

Apesar da ausência de dispositivos drenantes, a estabilidade do talude de montante permanece relativamente elevada em função de dois fatores principais. Primeiramente, a atuação do tapete impermeável contribui para limitar a penetração do fluxo na base do talude, reduzindo poropressões nesta região. Em segundo lugar, a própria condição de carregamento

hidrostático em montante, com presença constante da lâmina d'água, exerce pressão estabilizadora sobre o talude, reduzindo o potencial de ruptura.

Em comparação aos demais casos analisados, o desempenho do talude de montante no Caso 03 se mantém em níveis similares aos observados no Caso 01 (vedação + drenagem) e superiores ao Caso 02 (apenas drenagem), refletindo o papel estabilizador da vedação em conjunto com o carregamento do reservatório.

Figura 4.26 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 03



Fonte: Autora (2025)

4.3.3.2 Rebaixamento rápido – Caso 03

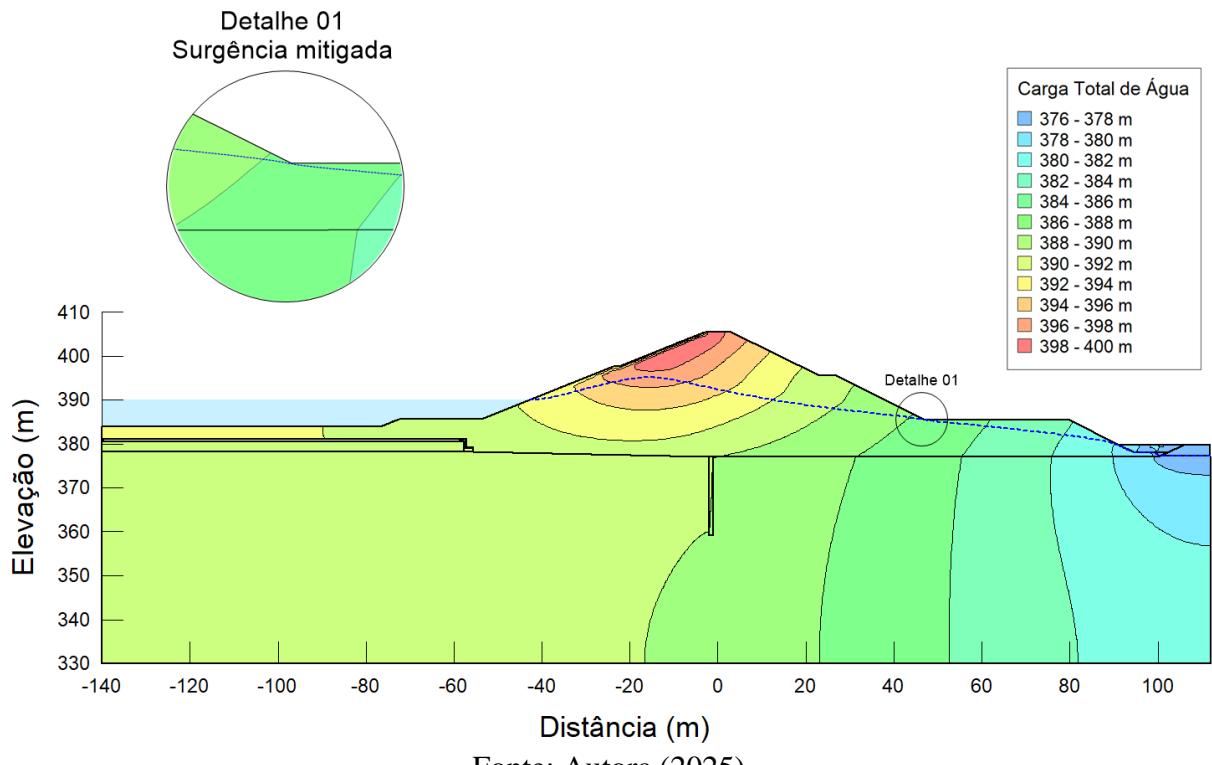
A Figura 4.27 apresenta os resultados da distribuição da carga total da água no cenário de rebaixamento rápido do nível do reservatório para o Caso 03. Essa configuração, como discutido anteriormente, representa também uma condição de colmatação dos sistemas de drenagem interna, permitindo avaliar o desempenho da estrutura frente à variação da carga hidráulica.

Observa-se que, mesmo após o rebaixamento do reservatório, a carga total permanece elevada no interior do maciço, especialmente na região de montante. Tal comportamento é característico de condições não drenadas, nas quais a dissipação das poropressões ocorre de forma lenta, especialmente em solos de baixa permeabilidade, como aterros compactados argilosos. A permanência de elevados valores de carga total após o rebaixamento indica que o maciço se encontra ainda saturado internamente.

Apesar do comportamento geral desfavorável, o Detalhe 01 mostra que a surgência previamente observada no talude de jusante encontra-se mitigada. A linha piezométrica recua ligeiramente da superfície, indicando um leve rebaixamento da carga na extremidade de jusante. Este efeito, ainda que limitado, decorre da retirada da lâmina d'água do reservatório, o que reduz o gradiente hidráulico ascendente naquela região.

Comparando com os Casos 01 e 02, o desempenho do Caso 03 no rebaixamento rápido permanece o mais crítico. No Caso 01, o sistema de drenagem interna favoreceu uma resposta hidráulica mais equilibrada, com dissipaçāo mais eficiente das poropressões. O Caso 02, embora não conte com dispositivos de vedação, possui filtro interno funcional, o que contribuiu para acelerar a transição hidráulica após o rebaixamento. No Caso 03, a drenagem ineficiente associada à contenção imposta pelas estruturas de vedação resulta em retenção de carga por tempo prolongado, potencializando o risco de ruptura, sobretudo no talude de montante.

Figura 4.27 - Carga total no rebaixamento rápido – Caso 03

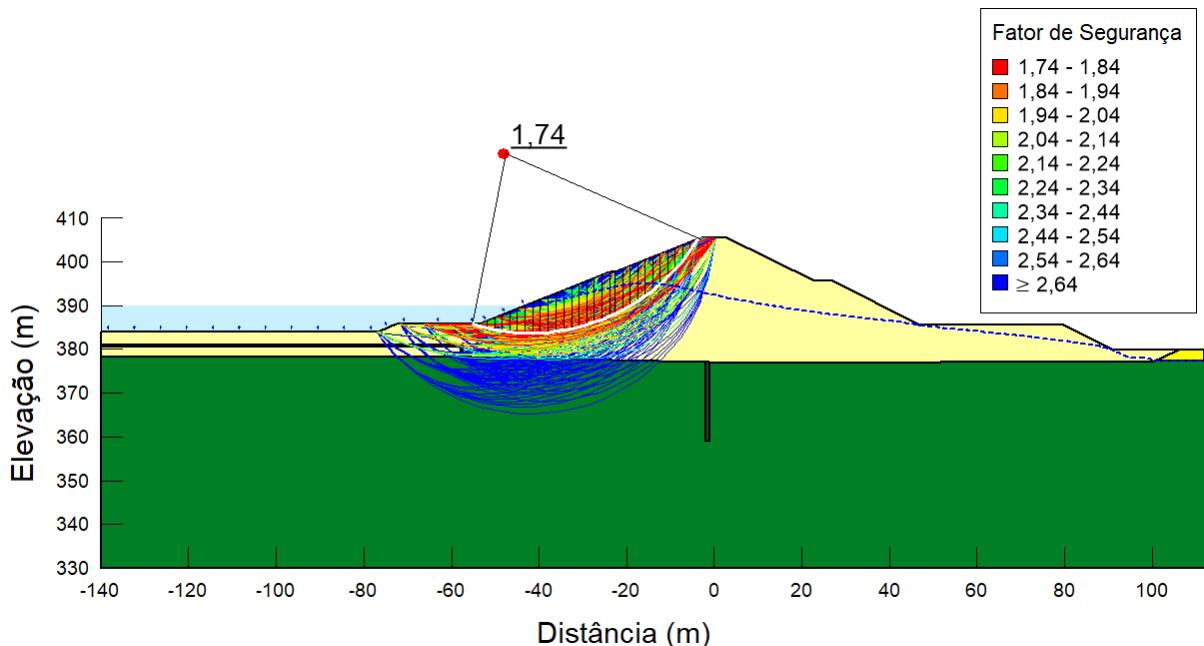


Conforme ilustrado na Figura 4.28, o fator de segurança obtido para o talude de montante durante o rebaixamento rápido foi 1,74, valor inferior ao observado em regime permanente. A superfície crítica de ruptura apresenta profundidade aumentada, refletindo o efeito da despressurização súbita da face montante em contraste com a manutenção de poropressões internas elevadas.

Nesta condição, destaca-se que os dispositivos de vedação, apesar de eficazes em regime permanente, passam a atuar de forma desfavorável à segurança do talude montante, ao dificultarem a dissipação da poropressão. O tapete impermeável e a cortina de injeção limitam a permeabilidade do sistema, o que retarda o reequilíbrio hidráulico após o rebaixamento. A ausência de elementos drenantes acentua esse efeito, mantendo o maciço em condição não drenada por mais tempo, com redução da resistência efetiva.

A combinação entre despressurização externa e retenção de carga interna induz uma situação de instabilidade potencial, particularmente crítica em barragens construídas com solos de baixa permeabilidade. A redução do fator de segurança observada confirma essa vulnerabilidade e evidencia a necessidade de considerar os efeitos do rebaixamento rápido no dimensionamento conjunto dos sistemas de vedação e drenagem.

Figura 4.28 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 03



Fonte: Autora (2025)

De forma geral, os resultados indicaram que, embora as estruturas de vedação tenham atuado na contenção do fluxo de montante, a ausência de mecanismos de dissipação hidráulica resultou na manutenção de elevados valores de carga total no interior do maciço. Esse comportamento favoreceu o desenvolvimento de condições não drenadas, com reflexo direto na estabilidade global da barragem.

Conforme apresentado na Tabela 4.7, os fatores de segurança obtidos foram 1,90 (montante) e 1,55 (jusante) para o regime permanente, e 1,74 (montante) para a condição de rebaixamento rápido. Embora todos os valores estejam acima dos limites mínimos

estabelecidos pela ABNT NBR 11682:2009, que admite reduções para condições transitórias, os resultados evidenciam margens de segurança reduzidas, com significativo volume mobilizado no interior do aterro.

Tabela 4.7 - Valores de fator de segurança obtidos para o Caso 03

Caso	Configuração	Fator de segurança (FS)		
		Regime permanente		Rebaixamento rápido
		Montante	Jusante	Montante
3	Tapete + Cortina de injeção	1,90	1,55	1,74

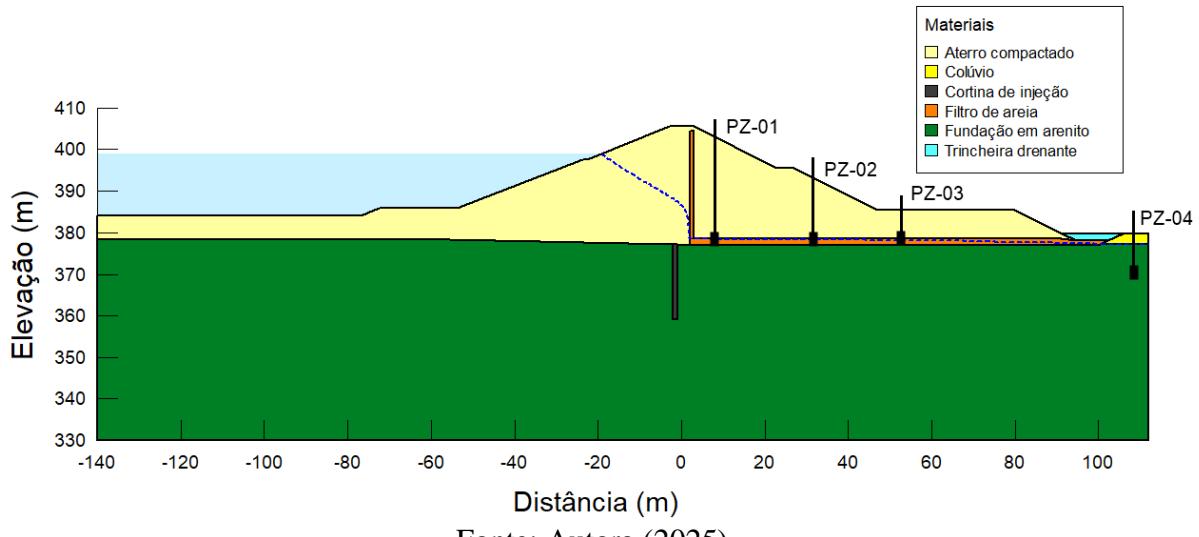
Fonte: Autora (2025)

Comparativamente, o Caso 01, que combinou vedação e drenagem, apresentou os melhores desempenhos hidráulico e geotécnico, com rebaixamento efetivo da carga hidráulica e fatores de segurança mais elevados. O Caso 02, apesar da ausência de dispositivos de vedação, contou com filtro interno funcional, o que favoreceu a dissipação das poropressões e resultou em condição estrutural mais equilibrada que o Caso 03. Assim, entre os três cenários, o Caso 03 foi o que apresentou o comportamento mais desfavorável, evidenciando que a vedação, quando não associada à drenagem, é menos eficiente em garantir a segurança hidráulica e a estabilidade da estrutura em condições permanentes ou transitórias.

4.3.4 Caso 04 – Situação com somente cortina de injeção associada à drenagem

A Figura 4.29 apresenta a geometria modelada para o Caso 04, caracterizado pela presença da cortina de injeção e do filtro interno associado à trincheira drenante. Esta configuração foi concebida com o objetivo de avaliar o desempenho isolado de um dos elementos de vedação combinado com a drenagem, no controle da percolação e na estabilidade global da barragem. No subtópico a seguir, são apresentados os resultados obtidos para o regime permanente.

Figura 4.29 - Seção modelada para o caso 04 do estudo



Fonte: Autora (2025)

4.3.4.1 Regime permanente – Caso 04

A Figura 4.30 apresenta a distribuição da carga total da água e os vetores de fluxo obtidos no regime permanente para o Caso 04, o qual foi modelado com o intuito de avaliar o desempenho isolado da cortina de injeção, em combinação com o sistema de drenagem. Esta configuração permite verificar a eficácia do elemento de vedação vertical (cortina) na redução da percolação ascendente pela fundação, ao mesmo tempo em que se avalia a capacidade dos dispositivos drenantes em controlar o fluxo no interior do maciço.

Os resultados indicam que a cortina de injeção atua como uma barreira hidráulica localizada, promovendo certo rebaixamento das linhas equipotenciais imediatamente a jusante de sua posição. Esse comportamento é evidenciado no Detalhe 02, onde se observa a deflexão do fluxo ascendente na fundação.

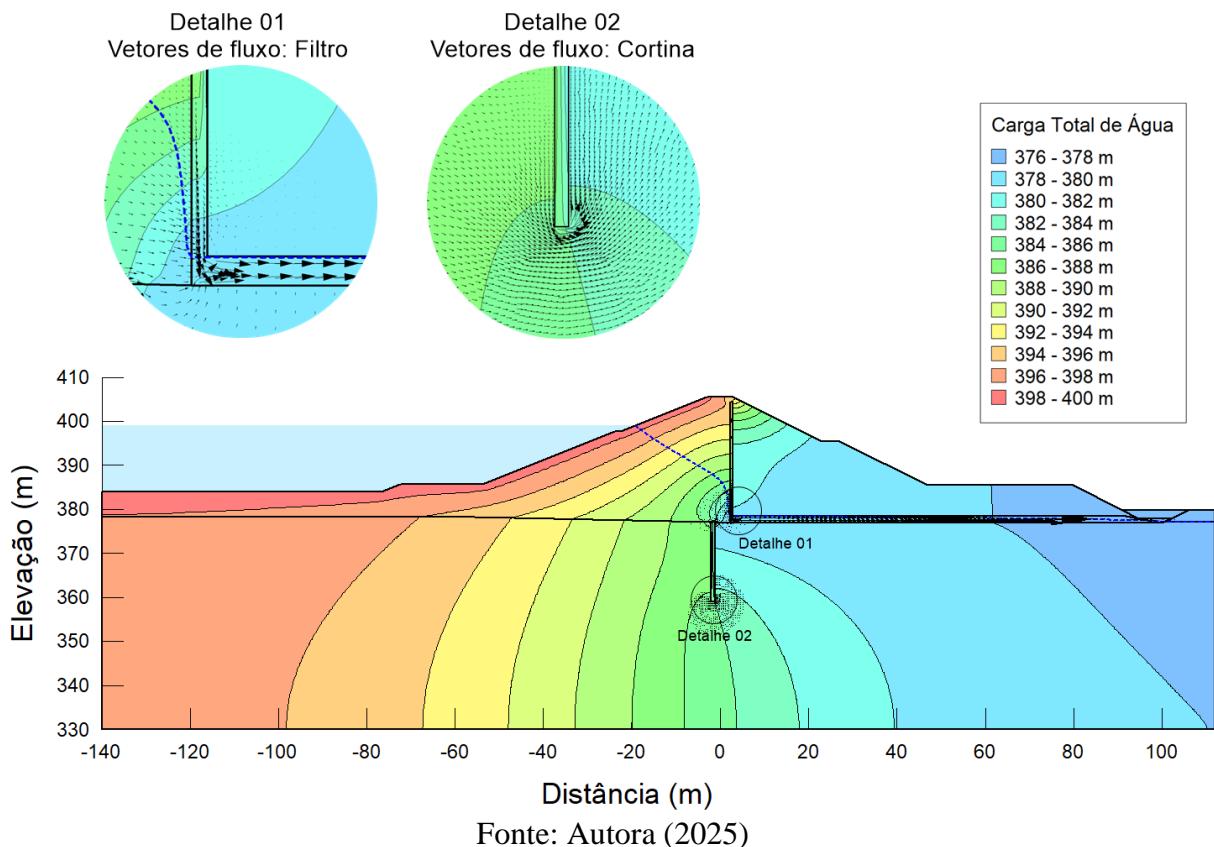
Já o sistema de drenagem apresenta desempenho satisfatório, conforme ilustrado no Detalhe 01, onde os vetores de fluxo convergem para a trincheira, demonstrando sua efetividade na captação e condução da água percolada. Esse comportamento promove um rebaixamento da carga total a jusante, contribuindo para a dissipação das pressões neutras e favorecendo a estabilidade do talude.

Entretanto, ao comparar os resultados globais deste caso com os do Caso 02, que não conta com nenhum dispositivo de vedação, observa-se um comportamento bastante similar em termos de distribuição da carga total no interior do maciço. Essa semelhança sugere que, quando atuando de forma isolada, a cortina de injeção apresenta efeito limitado sobre o regime geral de percolação. A vedação localizada promovida por esse tipo de cortina não é suficiente para

modificar significativamente o campo de cargas totais. Assim, os ganhos observados neste caso são atribuídos, majoritariamente, à atuação dos dispositivos drenantes.

Em síntese, os resultados de carga total evidenciam que, embora a cortina de injeção proporcione algum controle localizado do fluxo, seu impacto global sobre o regime hidráulico é reduzido quando não associada a outros elementos de vedação, como o tapete impermeável. A drenagem, por sua vez, continua desempenhando papel fundamental na redução das cargas.

Figura 4.30 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 04

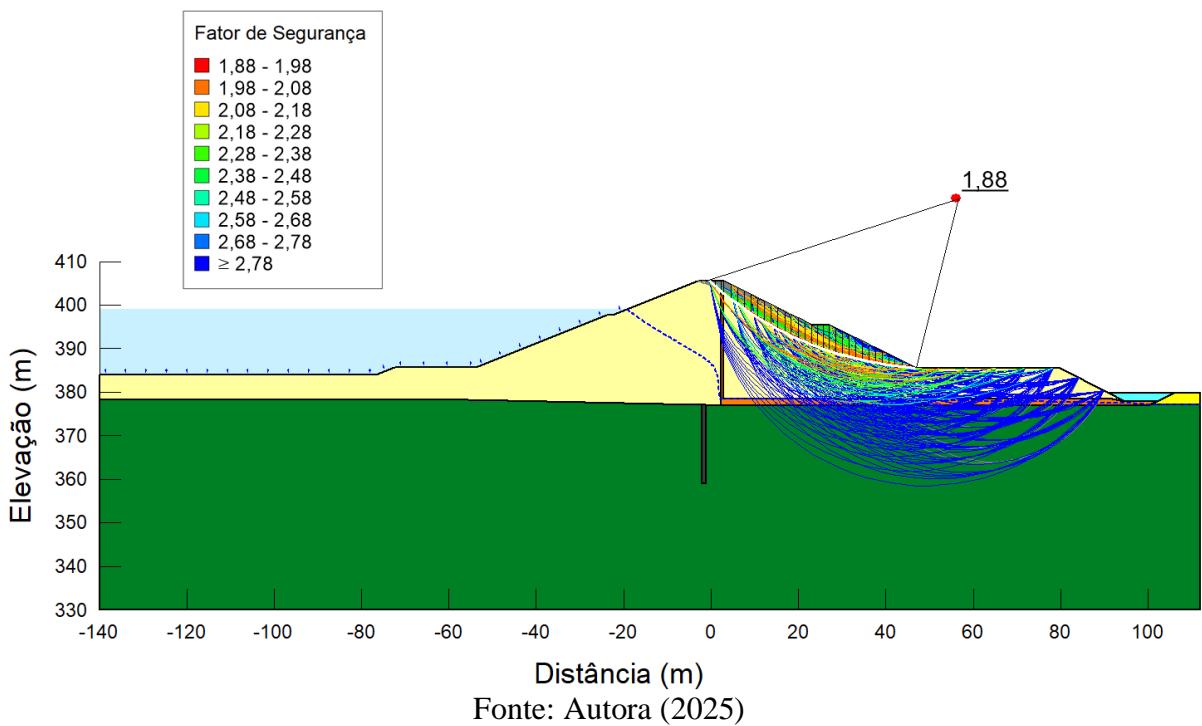


A Figura 4.31 apresenta a superfície de ruptura crítica e os respectivos fatores de segurança obtidos para o talude de jusante no regime permanente, considerando a configuração do Caso 04. O fator de segurança calculado para a superfície crítica foi de 1,88, valor significativamente acima do mínimo recomendado pela NBR 11682 (2009) para condições normais de operação, o que indica uma condição estável para o talude analisado.

A contribuição da cortina de injeção para o talude de jusante é indireta, atuando principalmente na redistribuição das cargas hidráulicas na fundação. No entanto, conforme discutido na análise da carga total, o efeito da cortina foi pontual e limitado quando comparado à atuação dos dispositivos de drenagem.

Ao se comparar com os casos anteriores, observa-se que o fator de segurança obtido no Caso 04 é similar ao do Caso 01, que também apresenta sistema de drenagem completo, mas com vedação adicional por tapete impermeável superficial. Já em relação ao Caso 02, que não possui nenhum dispositivo de vedação, o valor de 1,88 representa uma melhora modesta, o que reforça a conclusão de que o desempenho do talude está fortemente associado à drenagem eficiente, enquanto o efeito da vedação localizada por cortina tem impacto reduzido na estabilidade do talude de jusante.

Figura 4.31 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 04



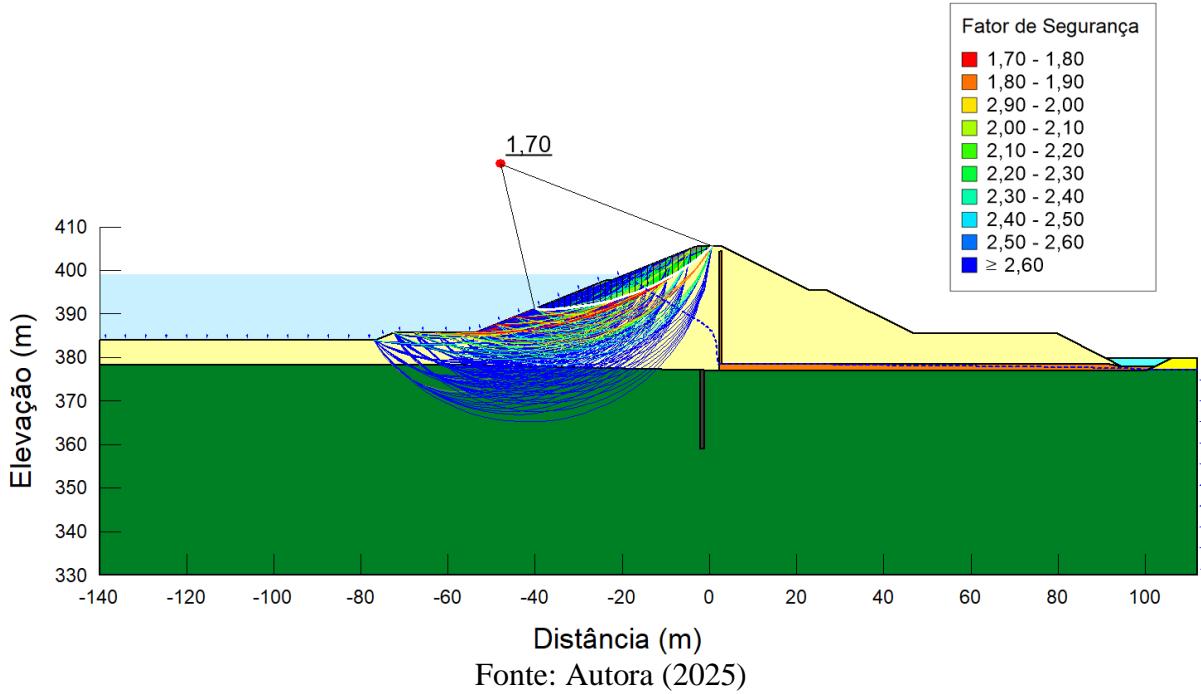
A Figura 4.32 apresenta a superfície de ruptura crítica e os fatores de segurança obtidos para o talude de montante no regime permanente. O fator de segurança calculado para a superfície crítica foi de 1,70, indicando uma condição estável, segundo os critérios da NBR 11682 (2009), embora menos robusta que a observada para o talude de jusante.

O valor de 1,70 é superior ao observado nos casos sem vedação (como o Caso 02), mas inferior ao do Caso 01, que contempla vedação superficial por tapete impermeável. Este resultado evidencia que a cortina de injeção, atuando de forma isolada como elemento de vedação, tem pouca efetividade na estabilização do talude de montante.

Em suma, embora o talude de montante permaneça em condição estável no Caso 04, o fator de segurança inferior a outros cenários com vedação superficial reforça a eficácia limitada da cortina de injeção para proteção dessa região. A ausência de barreiras na região de montante

permite a infiltração contínua no maciço, dificultando o controle das pressões neutras e a melhora da estabilidade estrutural.

Figura 4.32 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 04



Fonte: Autora (2025)

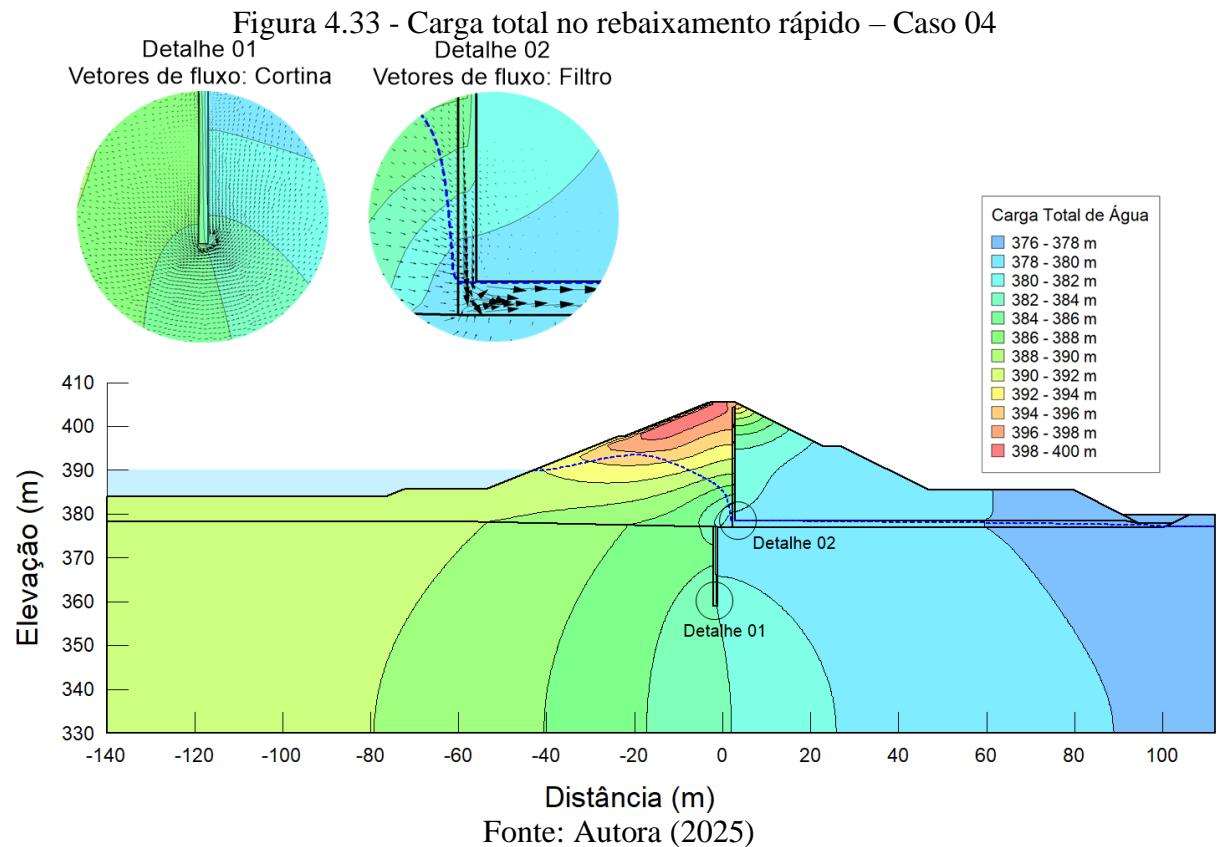
4.3.4.2 Rebaixamento rápido – Caso 04

A Figura 4.33 apresenta a distribuição da carga total da água e os vetores de fluxo para o cenário de rebaixamento rápido no Caso 04. Observa-se que, mesmo após a redução do nível do reservatório, o campo de cargas hidráulicas no interior do maciço permanece elevado, sobretudo na região de montante, indicando uma condição de escoamento não dissipado típica de transientes hidráulicos.

A cortina de injeção, por sua vez, mantém seu papel como barreira vertical de baixa permeabilidade, conforme ilustrado pelo gradiente concentrado junto à fundação. Entretanto, no contexto de rebaixamento rápido, esse dispositivo atua de forma desfavorável à segurança do maciço, uma vez que restringe o escoamento e retém o excesso de poropressão a montante da cortina, retardando a equalização hidráulica e promovendo maior carregamento interno sobre o talude.

A configuração observada se assemelha àquela verificada no Caso 02, que não conta com elementos de vedação, o que reforça a baixa efetividade da cortina de injeção como medida isolada de controle de percolação em situações transientes. Adicionalmente, a permanência de cargas totais elevadas no interior do maciço compromete as condições de estabilidade,

especialmente na zona de montante, onde o gradiente hidráulico permanece acentuado mesmo após a variação de nível.

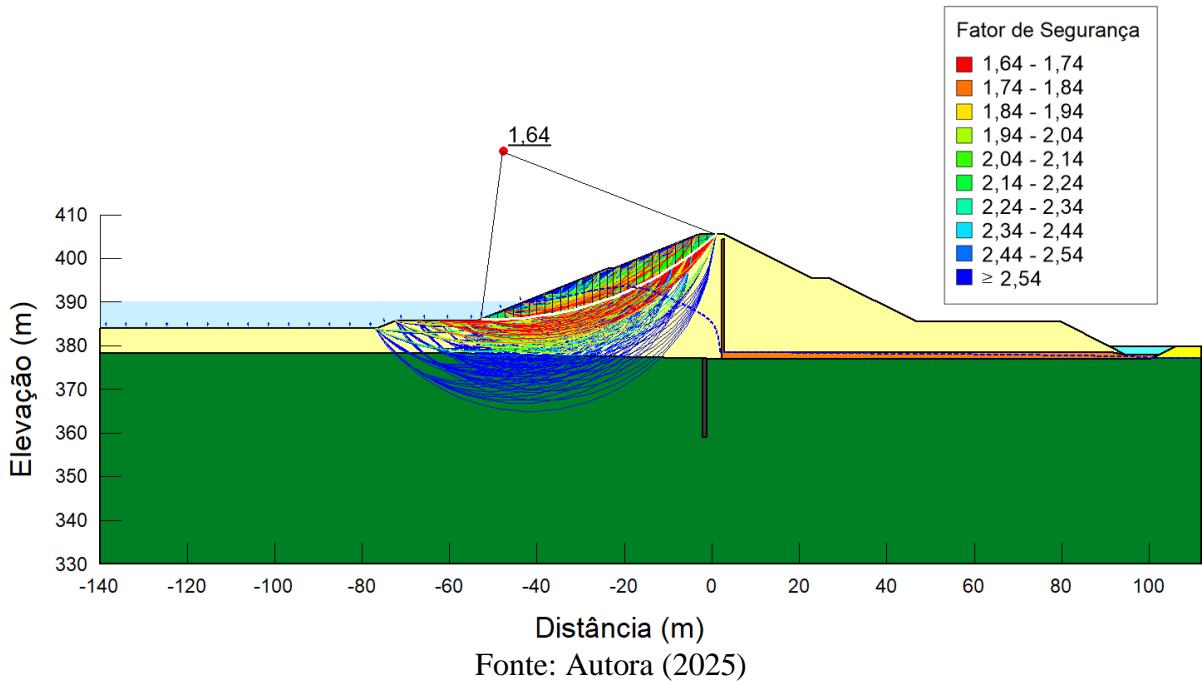


A Figura 4.34 ilustra a superfície de ruptura crítica e o fator de segurança obtido para o talude de montante submetido ao rebaixamento rápido no Caso 04. O fator de segurança calculado para essa condição foi de 1,64, valor que, embora superior ao mínimo admissível em condições críticas segundo a NBR 11682 (2009), representa um decréscimo em relação ao regime permanente, refletindo o agravamento das condições de estabilidade frente à variação do carregamento hidráulico.

A atuação da cortina de injeção, ao restringir a propagação do fluxo a jusante de sua posição, retarda a equalização hidráulica, favorecendo a concentração de pressões neutras a montante e contribuindo para a redução da resistência efetiva ao longo da superfície crítica.

A distribuição dos fatores de segurança ao longo das superfícies de ruptura simuladas apresenta maior dispersão em comparação ao regime permanente, com ocorrência de faixas em tons laranja e amarelo ($FS < 3,0$), o que evidencia a redução generalizada da margem de estabilidade. Essa condição reforça o entendimento de que, em situações de rebaixamento rápido, elementos de vedação como a cortina de injeção podem atuar de forma contraproducente, ao dificultar a dissipação das poropressões acumuladas no maciço.

Figura 4.34 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 04



A Tabela 4.8 resume os fatores de segurança obtidos para o Caso 04. Os resultados indicam desempenho satisfatório para ambas as condições analisadas: regime permanente e rebaixamento rápido.

Os resultados confirmam que, nesta configuração, a estabilidade global da barragem depende predominantemente da eficiência do sistema de drenagem, enquanto a contribuição da cortina de injeção, embora localizada, apresenta impacto limitado sobre o comportamento global da estrutura.

Tabela 4.8 - Valores obtidos para o Caso 04

Caso	Configuração	Fator de segurança (FS)		
		Regime permanente		Rebaixamento rápido
		Montante	Jusante	Montante
4	Cortina de injeção + Filtro	1,70	1,88	1,64

Fonte: Autora (2025)

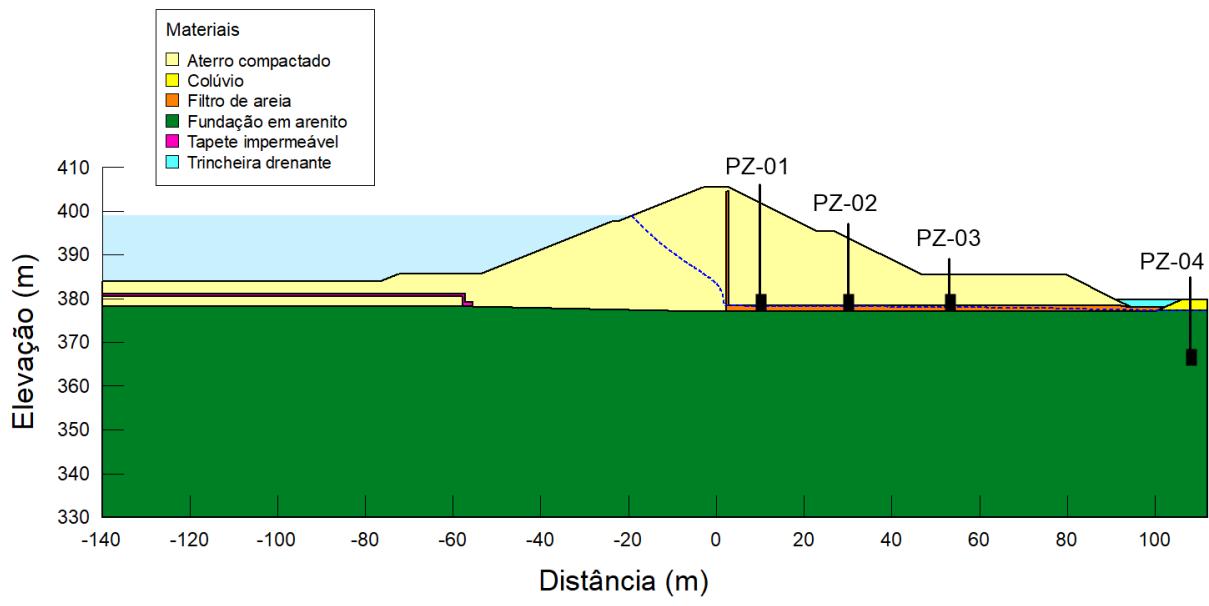
4.3.5 Caso 05 - Situação com somente tapete impermeável associado à drenagem

O Caso 05 corresponde à configuração em que o sistema de vedação é composto unicamente pelo tapete impermeável, instalado na região de montante do maciço. Essa alternativa é similar à do Caso 04, que combinava drenagem interna com uma cortina de

injeção, contudo, neste caso, o foco é avaliar a eficiência isolada do tapete impermeável na contenção do fluxo subterrâneo e na estabilização da estrutura.

A análise permite identificar a contribuição específica desse elemento de vedação para a redução das cargas hidráulicas internas e para o desempenho global da barragem frente às condições de regime permanente e rebaixamento rápido. A disposição dos materiais e instrumentos utilizados no modelo numérico está representada na Figura 4.35.

Figura 4.35 - Seção modelada para o caso 05



4.3.5.1 Regime permanente – Caso 05

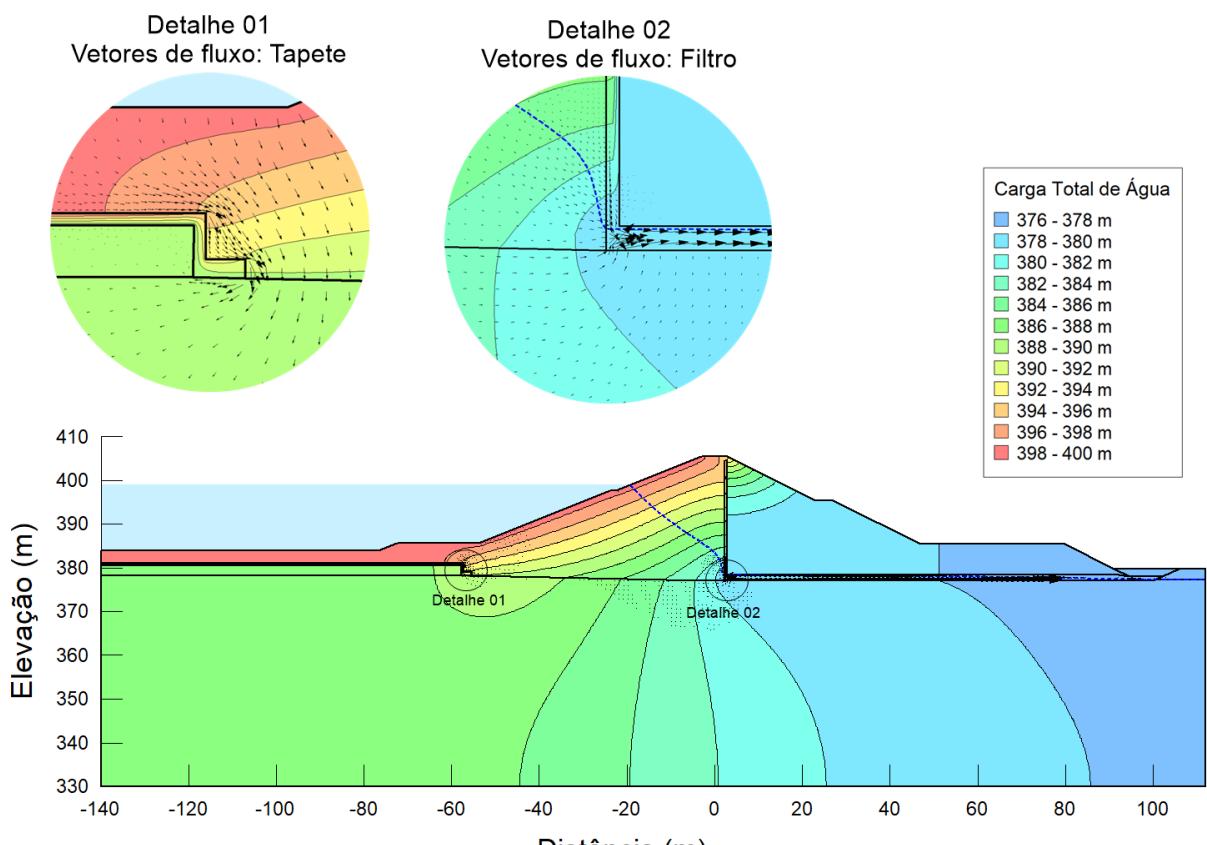
A distribuição da carga total de água, apresentada na Figura 4.36, revela um comportamento hidráulico significativamente mais favorável em comparação aos cenários sem vedação ou com vedação vertical. As linhas equipotenciais mostram-se fortemente rebaixadas na interface entre o reservatório e o tapete, evidenciando que este dispositivo atua como uma barreira eficaz à entrada do fluxo no maciço. Esse rebaixamento da carga hidráulica limita a penetração de água nas zonas profundas do aterro, promovendo um controle efetivo da percolação desde a superfície.

A análise dos vetores de fluxo (Detalhe 01) confirma esse desempenho: observa-se a formação de trajetórias mais rasas e desviadas lateralmente, em oposição à penetração vertical observada nos casos sem o tapete. Tal comportamento reduz o carregamento hidráulico sobre o interior do maciço de fundação, contribuindo para a diminuição das pressões neutras e, por consequência, para o aumento da estabilidade global da estrutura.

Na região de jusante (Detalhe 02), o sistema de drenagem interna demonstra funcionamento eficiente, com vetores bem orientados em direção à trincheira, indicando que parte do fluxo residual é devidamente interceptada. Isso reforça a atuação sinérgica entre os dispositivos de vedação e drenagem na condução e alívio das cargas hidráulicas.

Em comparação com o caso 04, apesar de ambos os casos contarem com drenagem interna, o tapete impermeável se mostra significativamente mais eficaz do que a cortina de injeção na redução da carga total de água no regime permanente. Este resultado destaca a relevância da localização e extensão da barreira de vedação para o desempenho hidráulico.

Figura 4.36 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 05



Fonte: Autora (2025)

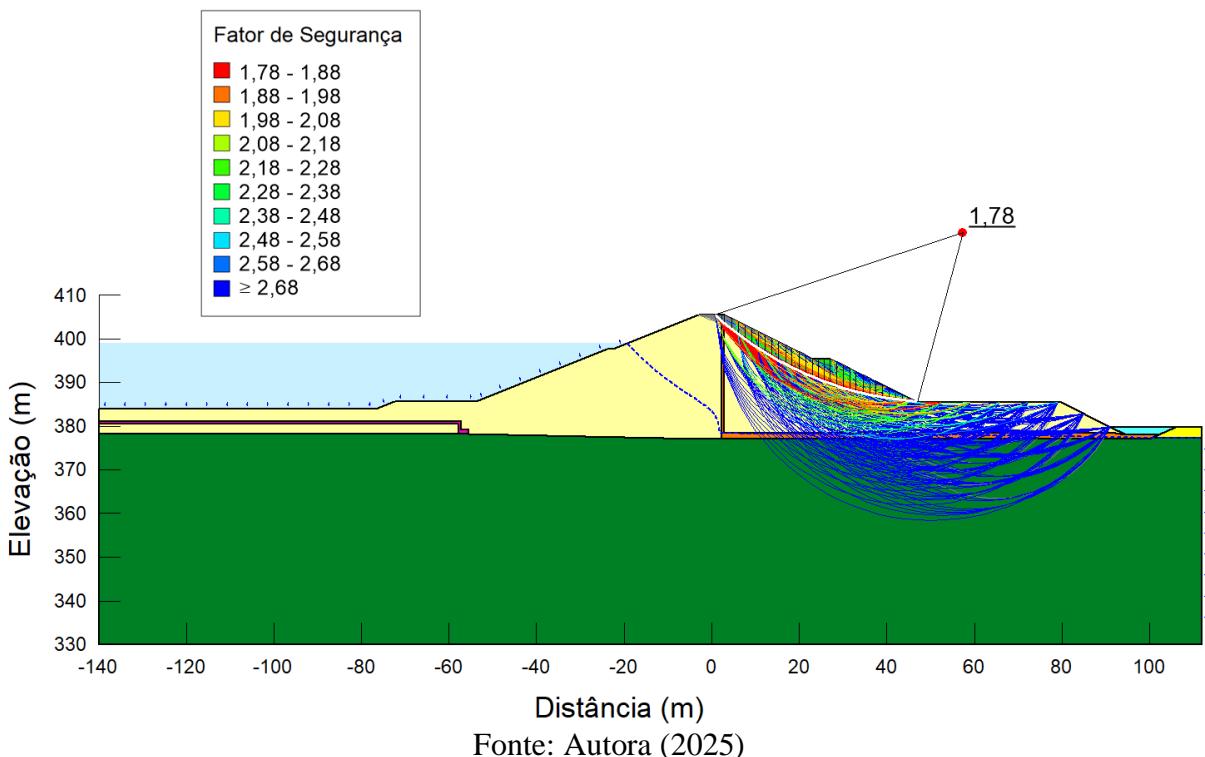
A Figura 4.37 apresenta os resultados da análise de estabilidade do talude de jusante no regime permanente para o Caso 05. A superfície crítica de ruptura foi determinada com base no método de Morgenstern-Price, resultando em um fator de segurança global de 1,78.

Esse valor está acima do limite mínimo de segurança recomendado pelas diretrizes técnicas para condições permanentes, indicando que a configuração analisada atende aos requisitos de estabilidade sob carregamento hidráulico estático. No entanto, a análise

comparativa com os demais casos modelados, revela que o desempenho estrutural do Caso 05, embora satisfatório, é intermediário em termos de estabilidade do talude de jusante.

Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que, embora o tapete impermeável atue de forma eficaz na contenção do fluxo na região de montante, sua atuação é restrita às camadas superficiais do maciço. Com isso, parte da percolação subterrânea ainda se propaga até a jusante, elevando as pressões intersticiais nas camadas inferiores. A atuação complementar do sistema de drenagem é, portanto, fundamental para manter os níveis de segurança observados.

Figura 4.37 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 05



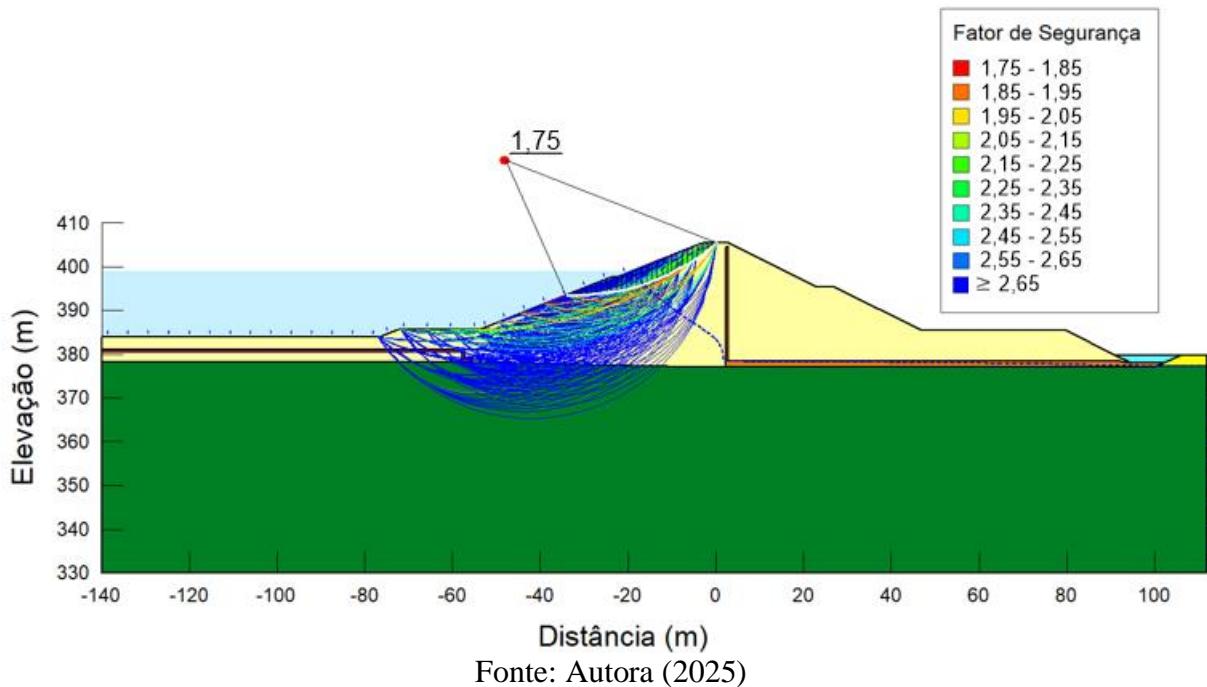
Fonte: Autora (2025)

A Figura 4.38 apresenta a análise de estabilidade do talude de montante para o Caso 05. O fator de segurança global obtido foi de 1,75, valor que se encontra acima do limiar mínimo convencionalmente adotado para estruturas em operação sob regime estático. Tal resultado confirma a estabilidade do talude de montante nesta condição, ainda que represente um desempenho ligeiramente inferior àquele verificado em outras configurações dotadas de múltiplos dispositivos de vedação, como no Caso 01 ($FS = 2,03$) e Caso 03 ($FS = 1,90$).

A análise do padrão de coloração ao longo das superfícies de ruptura revela que a maior parte dos elementos está submetida a fatores de segurança locais superiores a 3,0 (em tonalidades azuladas), indicando comportamento estrutural amplamente estável. As regiões com menores fatores concentram-se na porção superior do talude.

O desempenho observado é coerente com os resultados hidráulicos previamente analisados, que indicaram uma atuação eficiente do tapete impermeável na contenção da percolação em montante, com significativa redução da carga total na região de entrada do fluxo. Essa barreira superficial limitou a infiltração profunda, restringindo o desenvolvimento de pressões neutras elevadas na base do talude e contribuindo diretamente para o aumento do fator de segurança global.

Figura 4.38 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 05



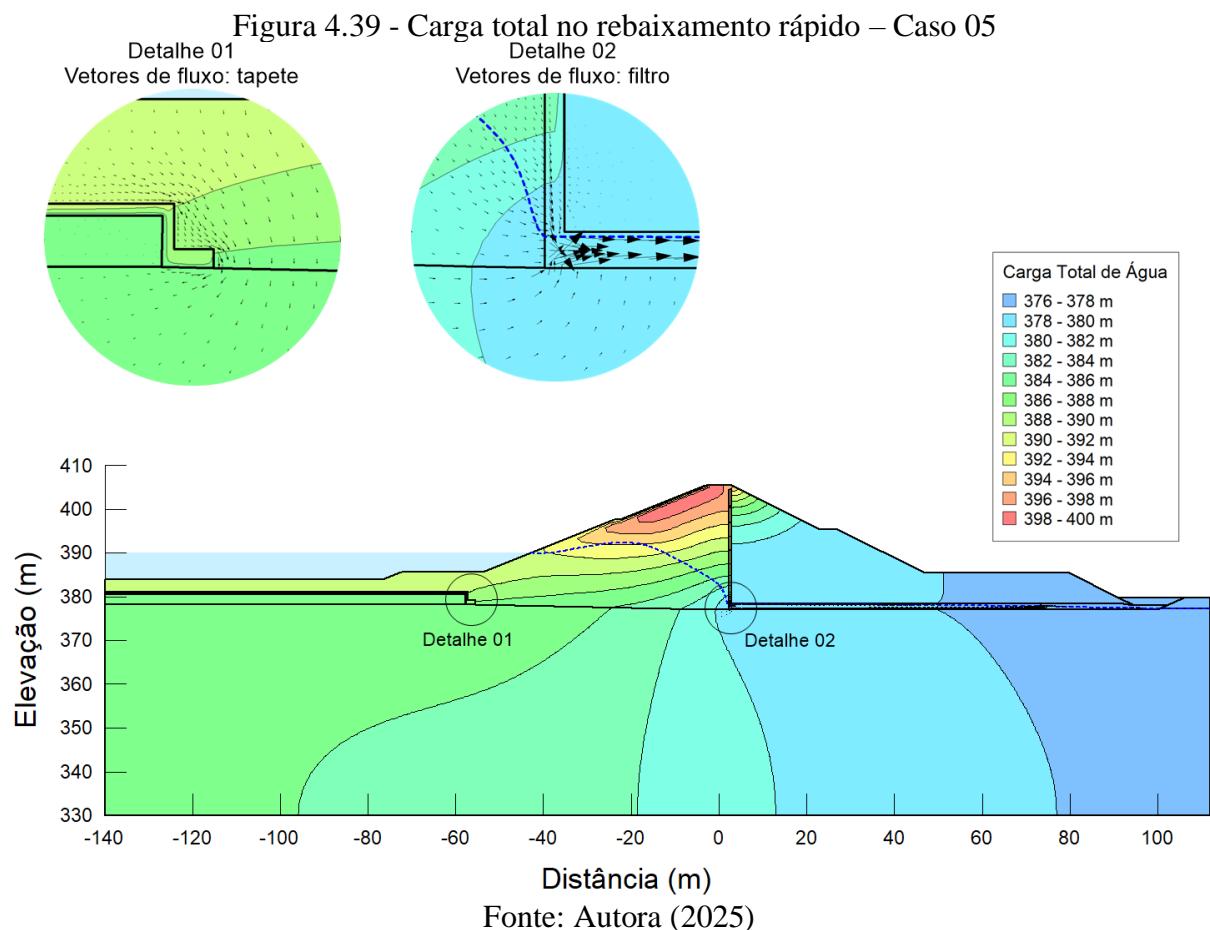
4.3.5.2 Rebaixamento rápido – Caso 05

A Figura 4.39 apresenta a distribuição da carga total da água no Caso 05 sob a condição de rebaixamento rápido do nível do reservatório, destacando o comportamento transiente da estrutura frente à dissipaçāo das pressões hidráulicas. Observa-se que, mesmo após a queda da lâmina d'água, as linhas equipotenciais permanecem com valor elevado na região de montante, refletindo a dificuldade de dissipaçāo imediata da poropressão acumulada no interior do maciço de baixa permeabilidade.

O tapete impermeável, que atua de forma bastante eficaz em regime permanente como barreira à infiltração, assume um papel mais ambíguo nesta condição. Embora continue restringindo o fluxo na interface com o reservatório, sua presença também desacelera o processo de drenagem do talude de montante, uma vez que impede o alívio das pressões neutras diretamente pela região de montante da barragem. Como resultado, há um retardado na dissipaçāo da carga hidráulica na região do tapete.

Essa limitação é evidenciada no Detalhe 01, que mostra vetores de fluxo com baixa magnitude e orientação predominantemente lateral sob o tapete, refletindo o bloqueio do alívio superficial direto. Já o Detalhe 02, focado na drenagem de jusante, evidencia o papel ativo do filtro e da trincheira drenante na interceptação do fluxo, com vetores convergentes indicando a condução eficiente das pressões remanescentes para regiões de menor carga.

Em síntese, os resultados demonstram que, no cenário de rebaixamento rápido, o tapete impermeável exerce papel duplo: enquanto contribui para limitar a entrada de água no regime permanente, também dificulta a drenagem imediata da poropressão pela face de montante, atrasando a transição para o novo equilíbrio hidráulico.



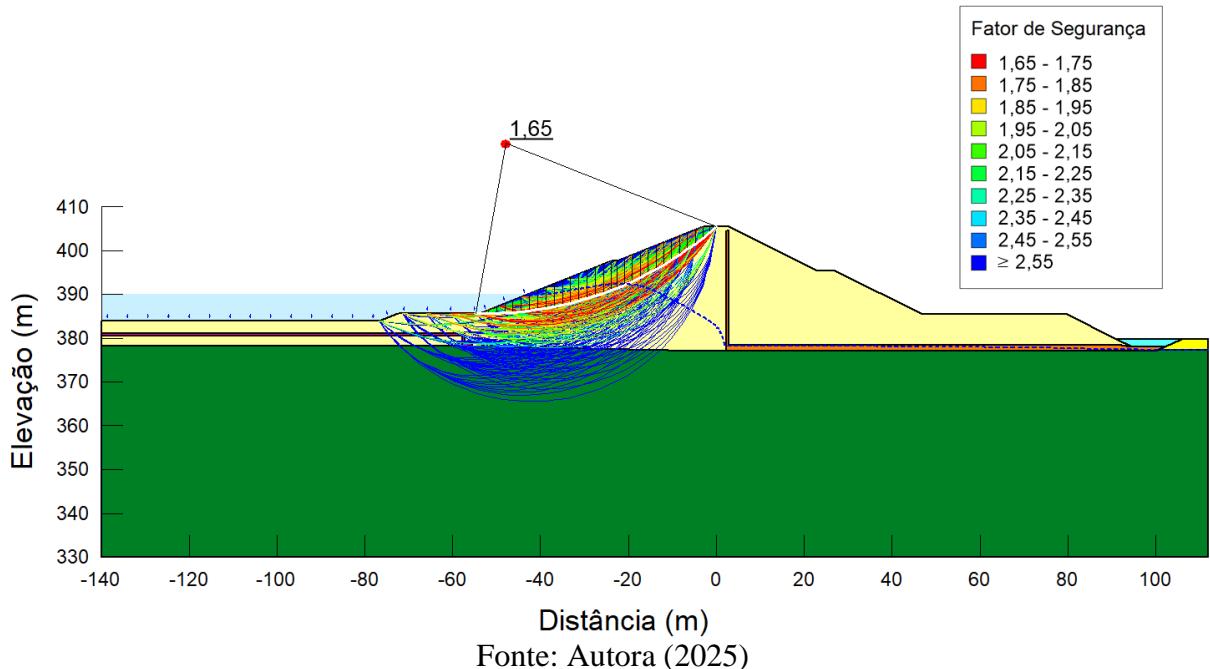
A Figura 4.40 ilustra a superfície crítica de ruptura no talude de montante para o Caso 05, durante o rebaixamento rápido do nível d'água. O fator de segurança obtido foi de 1,65, indicando que, embora a estrutura se mantenha em condições estáveis, a margem de segurança é reduzida quando comparada aos demais regimes de carregamento.

A geometria da superfície de ruptura revela um mecanismo que se desenvolve a partir da crista da barragem e avança em profundidade moderada, envolvendo predominantemente o corpo do aterro. O padrão de coloração das demais superfícies de ruptura, mostra a concentração

dos menores fatores de segurança nas camadas superficiais do talude, o que sugere maior sensibilidade dessas regiões à resposta hidráulica transiente.

Esse comportamento evidencia uma limitação localizada da estrutura frente ao rebaixamento rápido, especialmente nas zonas de maior confinamento hidráulico. A atuação das pressões neutras remanescentes, concentradas na parte superior do talude, se reflete diretamente na redução do fator de segurança global, favorecendo mecanismos de instabilização rotacional em superfícies de menor profundidade.

Figura 4.40 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 05



A análise do Caso 05 (Tabela 4.9), evidencia que a configuração com tapete impermeável associado a um sistema de drenagem resulta em um desempenho global satisfatório frente às condições de regime permanente e rebaixamento rápido.

Quando comparado ao Caso 01, que associa os três dispositivos (tapete, cortina e filtro), o Caso 05 apresenta valores levemente inferiores, mas ainda em faixa de desempenho seguro, destacando-se como uma alternativa mais simples e eficiente.

Assim, o Caso 05 representa uma solução equilibrada entre desempenho hidráulico e estabilidade, com potencial aplicação prática em barragens de terra sujeitas a flutuações operacionais.

Tabela 4.9 – Valores de fator de segurança obtidos para o Caso 05

Caso	Configuração	Fator de segurança (FS)		
		Regime permanente		Rebaixamento rápido
		Montante	Jusante	Montante
5	Tapete + Filtro	1,75	1,78	1,65

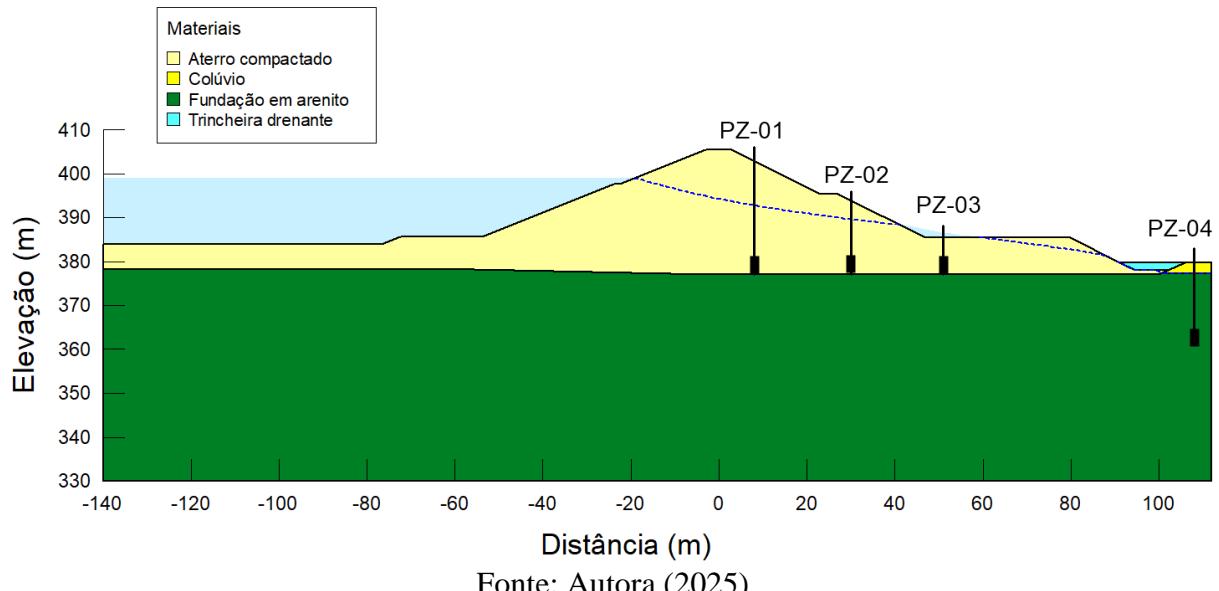
Fonte: Autora (2025)

4.3.6 Caso 06 – Situação sem vedação e sem drenagem

O Caso 06 representa a condição mais crítica dentre todas as configurações analisadas, uma vez que a barragem é modelada sem qualquer sistema de vedação ou de drenagem, permitindo a livre percolação da água por todo o maciço. A Figura 4.41 ilustra a geometria da seção modelada, composta pelo aterro compactado assentado sobre fundação em arenito.

A ausência de elementos de controle de percolação, como tapetes impermeáveis, cortinas de injeção ou filtros drenantes, torna este cenário especialmente relevante para avaliar o comportamento hidráulico e a estabilidade da barragem em sua forma mais vulnerável, servindo como referência para comparação com os demais casos simulados.

Figura 4.41 - Seção modelada para o caso 06



4.3.6.1 Regime permanente – Caso 06

A Figura 4.42 apresenta a distribuição da carga total de água no interior do maciço da barragem para o Caso 06, correspondente ao regime permanente sem a presença de dispositivos de vedação ou drenagem. Nessa configuração, observa-se uma elevação significativa da carga

total ao longo de todo o corpo da barragem, com linhas equipotenciais amplamente espaçadas, indicando a livre percolação da água por meio do aterro compactado.

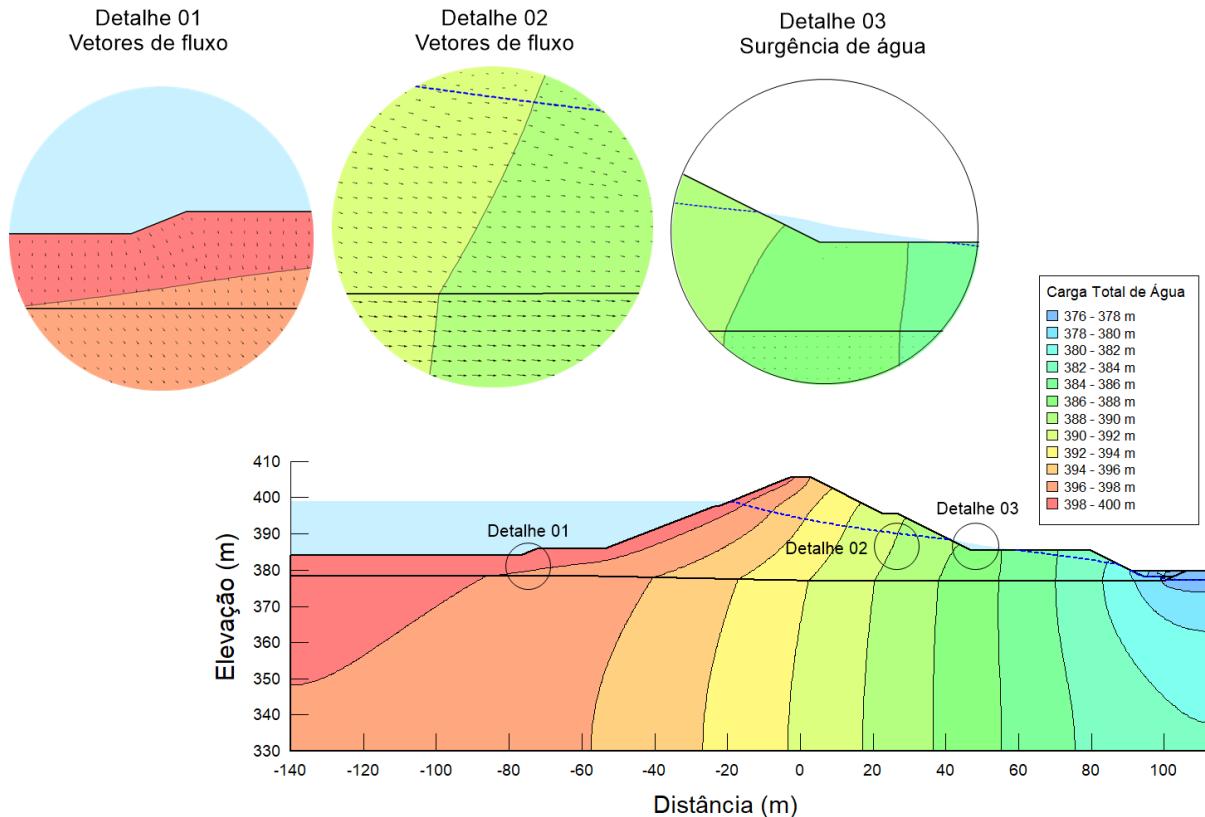
O Detalhe 01, localizado na região de montante, mostra a direção dos vetores de fluxo em sentido quase perpendicular ao contato do aterro com a fundação. Este padrão indica forte entrada de água na base do maciço, sem qualquer resistência hidráulica adicional. A elevada concentração de fluxo nessa região intensifica o carregamento hidráulico no interior da barragem, podendo contribuir para o aumento da poropressão e da possibilidade de ruptura por instabilidade hidráulica.

O Detalhe 02, localizado no interior do maciço, evidencia que os vetores de fluxo se mantêm contínuos e direcionados para jusante, com pouca dispersão ou redirecionamento. Isso demonstra a ausência de elementos de controle interno, como filtros, que normalmente promoveriam uma dissipação gradual da poropressão. A concentração do fluxo ao longo de trajetórias bem definidas reforça o comportamento de percolação direta, característico de estruturas sem dispositivos de drenagem.

O aspecto mais crítico está representado no Detalhe 03, na região do talude de jusante, onde se verifica uma condição de urgência de água na berma, com a linha de carga ultrapassando a superfície do terreno. Essa condição pode induzir à erosão interna localizada ou instabilidade superficial, especialmente na ausência de filtros drenantes que controlem a dissipação da poropressão e evitem a expulsão de finos. Trata-se, portanto, de uma situação potencialmente instabilizadora que exige atenção especial em termos de segurança hidráulica.

Assim, o Caso 06 representa o pior desempenho hidráulico entre os cenários analisados, servindo como referência crítica para avaliação dos benefícios proporcionados pelos dispositivos de vedação e drenagem nos demais casos.

Figura 4.42 - Carga total e vetores de fluxo - Caso 06



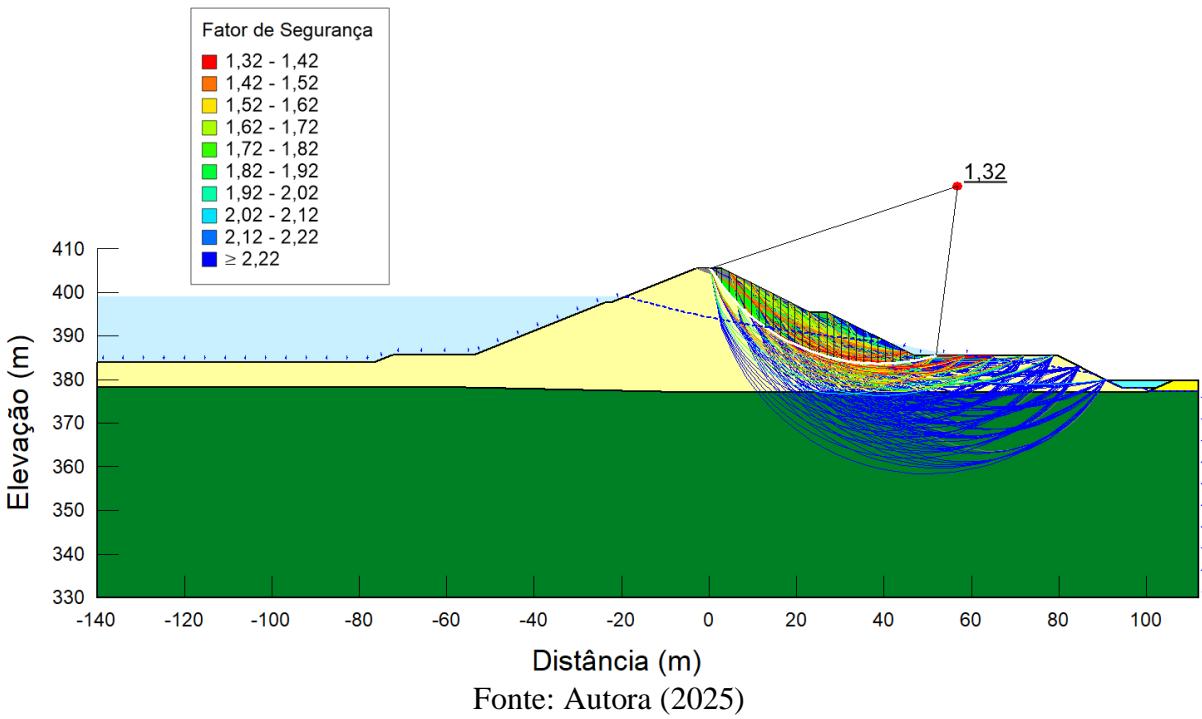
Fonte: Autora (2025)

A Figura 4.43 apresenta a superfície crítica de ruptura para o talude de jusante da barragem no regime permanente, conforme modelagem do Caso 06. Essa configuração, caracterizada pela ausência total de dispositivos de drenagem ou vedação, representa a condição mais desfavorável do ponto de vista da segurança estrutural, dado a livre percolação da água no interior do maciço.

O fator de segurança obtido para a superfície crítica foi de 1,32, valor inferior ao mínimo recomendado para o regime permanente, que é comumente estabelecido em 1,50. Esse resultado indica uma condição de estabilidade inadequada, exigindo medidas de controle ou reforço para que a estrutura atenda aos critérios de segurança previstos para sua operação regular.

A geometria da superfície de ruptura atravessa o corpo do talude de jusante, com concentração das menores faixas de fator de segurança (representadas em tons alaranjados e avermelhados) na região da berma, onde foi anteriormente identificada a ocorrência de surgência de água. Essa coincidência espacial reforça a influência direta das pressões neutras elevadas sobre a estabilidade global do talude, especialmente na ausência de mecanismos de dissipação como filtros drenantes.

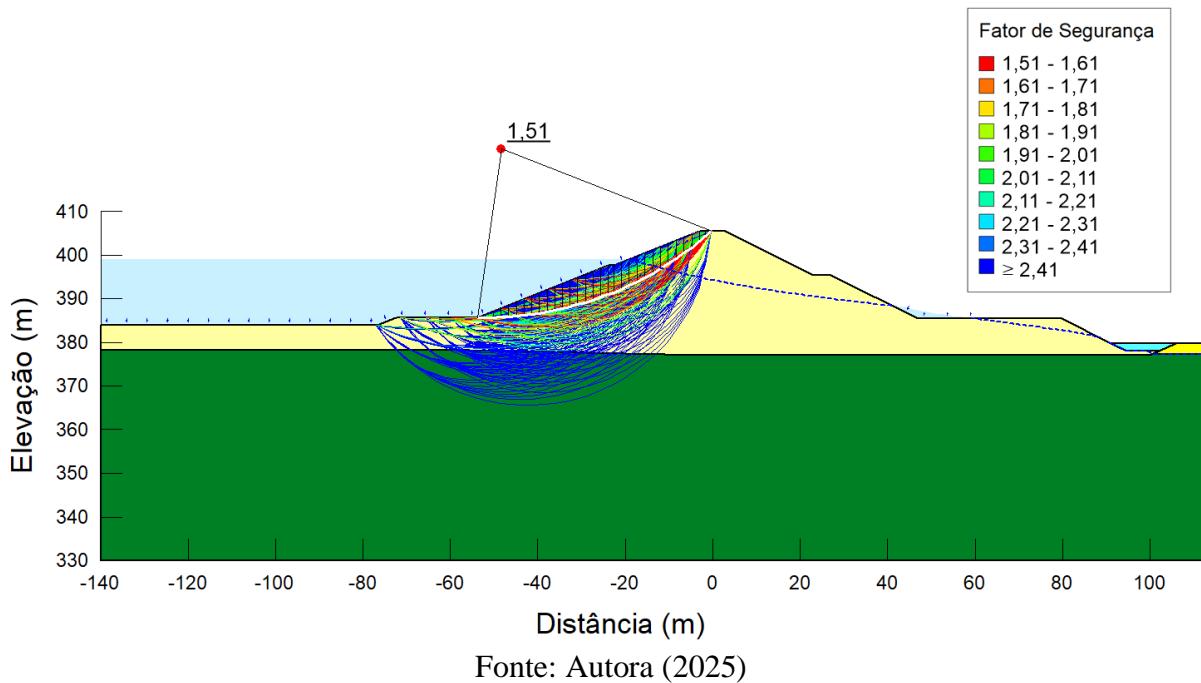
Figura 4.43 - Superfície de ruptura crítica do talude de jusante em regime permanente – Caso 06



A Figura 4.44 apresenta a análise de estabilidade do talude de montante da barragem no regime permanente, para o Caso 06. O fator de segurança calculado para a superfície crítica foi de 1,51, valor que atende ao critério mínimo recomendado para o regime permanente. Embora o valor esteja dentro da faixa aceitável, é importante ressaltar que se trata de uma condição limite, em que a ausência de um tapete impermeável ou cortina de injeção faz com que a linha de carga permaneça elevada, contribuindo para o aumento da poropressão e para a redução da resistência efetiva ao cisalhamento.

Apesar de a instabilidade ser menos frequente em taludes de montante sob regime permanente, pois o reservatório confere confinamento e sobrecarga estabilizadora, neste caso específico, a ausência de barreiras impermeáveis permite que o gradiente hidráulico atue mais profundamente no maciço, mantendo o talude em uma condição continuamente saturada. Esse cenário favorece a geração de tensões efetivas reduzidas, aumentando o potencial de movimentação do solo em profundidade, sobretudo em situações de carregamento prolongado.

Figura 4.44 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em regime permanente – Caso 06



4.3.6.2 Rebaixamento rápido – Caso 06

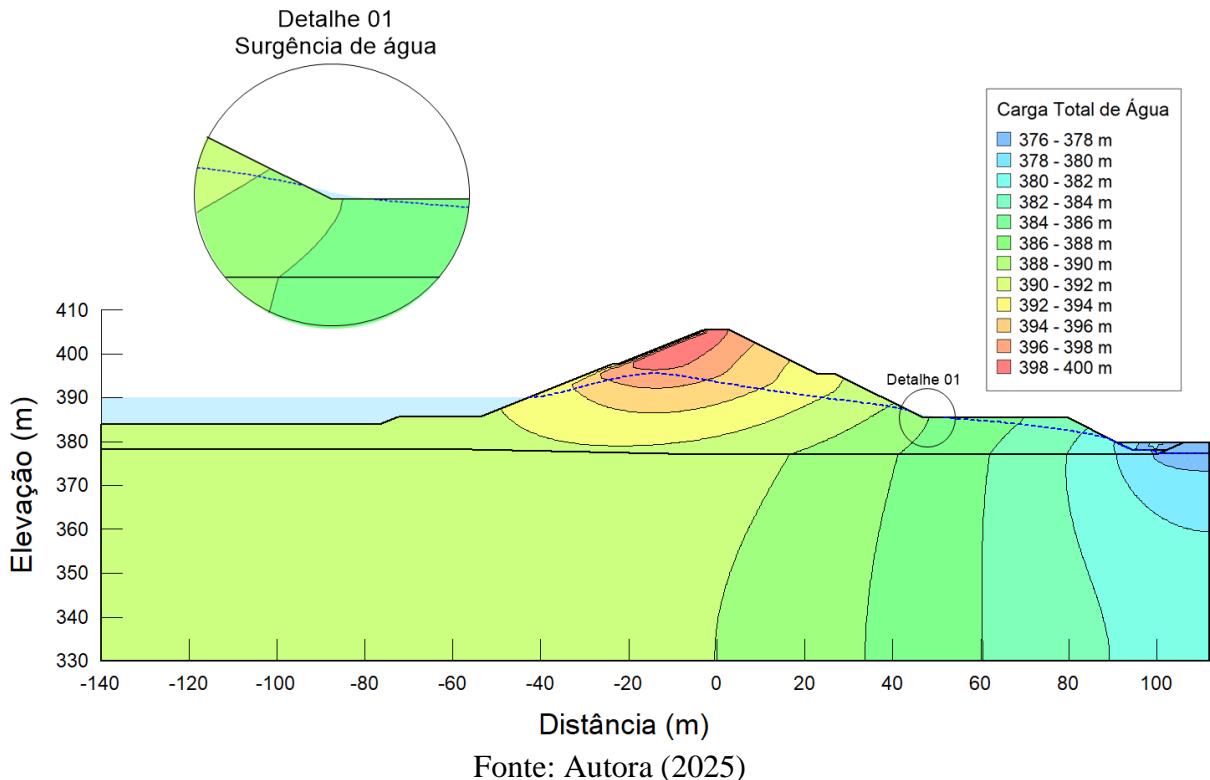
A Figura 4.45 ilustra o comportamento da carga total da água durante o rebaixamento rápido do reservatório no Caso 06. Observa-se que, mesmo após a redução da lâmina d'água, as linhas equipotenciais permanecem elevadas em grande parte do interior do barramento.

Um aspecto que se destaca neste caso é que o rebaixamento afeta uma parcela significativamente maior do maciço, quando comparado aos demais cenários analisados. Em função da ausência de qualquer dispositivo de drenagem ou vedação, a carga total permanece elevada em praticamente toda a extensão do aterro. Essa condição é evidenciada pela manutenção da linha de carga em níveis elevados, tanto na região central quanto na jusante da estrutura.

O Detalhe 01 reforça a criticidade do cenário, ao indicar a persistência da urgência de água na berma do talude de jusante, mesmo após o rebaixamento. Isso demonstra que não há capacidade de alívio hidráulico na interface do solo com a atmosfera, o que contribui para o acúmulo de tensões neutras e para a intensificação do gradiente hidráulico na saída do fluxo.

Comparativamente, nos demais casos que adotam filtros, cortinas de injeção ou tapetes impermeáveis, o rebaixamento tende a ser mais localizado ou suavizado, pois tais dispositivos contribuem para a dissipação gradual da poropressão. No Caso 06, entretanto, a ausência total de mecanismos de controle permite que o estado saturado se mantenha em uma proporção maior do maciço, agravando as condições de estabilidade durante esse regime transitório.

Figura 4.45 - Carga total no rebaixamento rápido – Caso 06



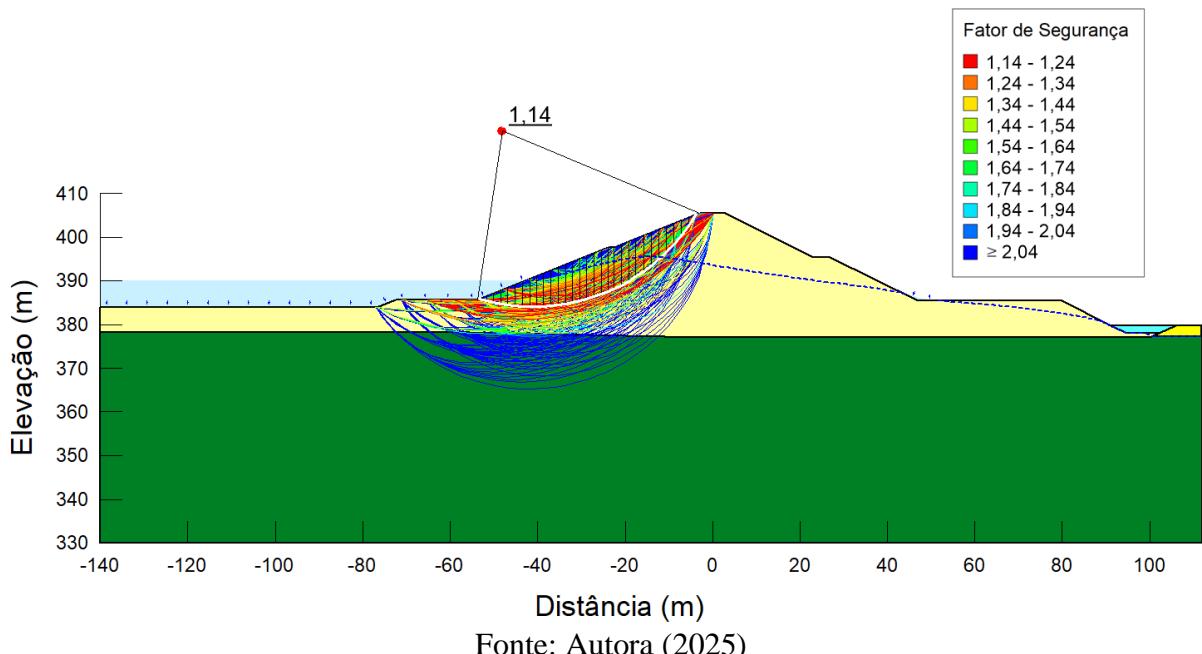
O valor de fator de segurança igual a 1,14 obtido para o talude de montante no cenário de rebaixamento rápido do reservatório evidencia uma condição estrutural comprometida (Figura 4.46). Tal valor está abaixo do limite mínimo recomendado para esse tipo de situação transiente, que, segundo diretrizes, deve ser igual ou superior a 1,30, a fim de assegurar margem adequada frente à redução da pressão hidrostática externa e à manutenção de poropressões elevadas no interior do maciço.

Essa condição é típica de maciços compactados com baixa permeabilidade, nos quais a dissipação da poropressão é limitada no tempo, fazendo com que a redução da lâmina d'água no reservatório não seja acompanhada por uma resposta hidráulica interna suficientemente rápida. Como resultado, ocorre uma perda do carregamento estabilizador externo, sem que haja uma redução equivalente da pressão neutra no interior do solo, configurando um estado de tensões total reduzido.

O comportamento observado, portanto, é característico de uma condição de carregamento não drenado sob rebaixamento rápido, em que o maciço permanece saturado e sujeito a deslizamentos por perda de resistência ao cisalhamento. A ausência de elementos de vedação, como tapetes impermeáveis, e de dispositivos drenantes, como filtros horizontais, impede a formação de caminhos de alívio de poropressões, intensificando o estado crítico de estabilidade observado.

Este resultado demonstra que o talude de montante, embora tipicamente mais estável em condições permanentes devido à ação confinante da água do reservatório, torna-se o elemento mais vulnerável da barragem durante o rebaixamento rápido, especialmente em configurações sem controle hidráulico. A adoção de medidas mitigadoras, como o controle da taxa de rebaixamento e a inserção de sistemas de drenagem interna, torna-se, portanto, indispensável para a prevenção de falhas associadas a essa condição operacional crítica.

Figura 4.46 - Superfície de ruptura crítica do talude de montante em rebaixamento rápido – Caso 06



Fonte: Autora (2025)

O Caso 06, representando a configuração sem dispositivos de vedação ou drenagem, apresentou os piores resultados de estabilidade entre todas as alternativas analisadas. Conforme sintetizado na Tabela 4.10, os fatores de segurança foram sistematicamente inferiores aos observados nos demais casos, tanto em regime permanente quanto durante o rebaixamento rápido.

No regime permanente, os taludes de montante e jusante apresentaram FS iguais a 1,51 e 1,32, respectivamente, valores inferiores aos obtidos, por exemplo, no Caso 02, que conta com drenagem e atingiu $FS > 1,70$ nos dois taludes. Durante o rebaixamento rápido, o FS do talude de montante caiu para 1,14, caracterizando uma condição de instabilidade crítica.

Tabela 4.10 - Valores de fator de segurança obtidos para o Caso 06

Caso	Configuração	Fator de segurança (FS)		
		Regime permanente		Rebaixamento rápido
		Montante	Jusante	Montante
6	Sem dispositivos de vedação ou drenagem	1,51	1,32	1,14

Fonte: Autora (2025)

4.4 Análise conjunta dos resultados

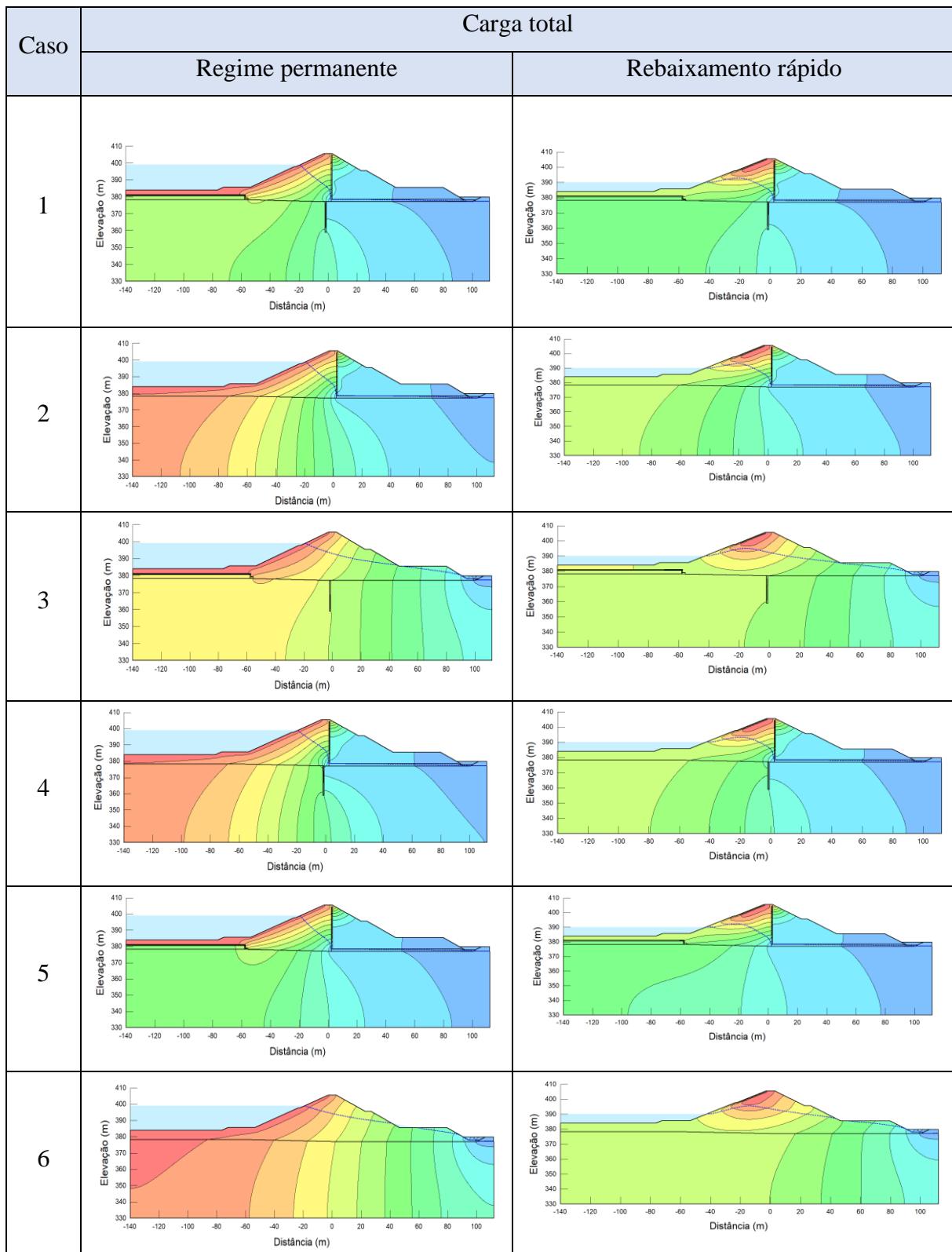
A análise conjunta dos fatores de segurança (Tabela 4.11) e dos diagramas de carga total (Tabela 4.12) demonstra a influência dos dispositivos de vedação e drenagem na estabilidade e no controle da percolação em barragens de terra, tanto no regime permanente quanto no rebaixamento rápido. Além disso, permite estabelecer comparações diretas com estudos similares já realizados, fortalecendo a consistência dos resultados obtidos.

Tabela 4.11 – Fatores de segurança obtidos nas análises

Caso	Configuração	Fator de segurança (FS)		
		Regime permanente		Rebaixamento rápido
		Montante	Jusante	Montante
1	Tapete + Cortina de injeção + Filtro	2,03	1,91	1,99
2	Filtro apenas	1,98	1,82	1,89
3	Tapete + Cortina de injeção	1,90	1,55	1,74
4	Cortina de injeção + Filtro	1,70	1,88	1,64
5	Tapete + Filtro	1,75	1,78	1,65
6	Sem dispositivos de vedação ou drenagem	1,51	1,32	1,14

Fonte: Autora (2025)

Tabela 4.12 – Resultados de carga total obtidos nas análises.



Fonte: Autora (2025)

O Caso 06, sem qualquer dispositivo de controle, apresentou o pior desempenho, tanto em termos de estabilidade quanto no controle da carga total, que se manteve elevada em praticamente todo o corpo da barragem. Este comportamento é coerente com os resultados observados em estudos como o de Foster et al. (2000), que apontam que a ausência de sistemas de drenagem interna e vedação está diretamente associada a cenários de maior risco de ruptura, especialmente por mecanismos de *piping* e instabilidade de taludes.

O Caso 01, com a adoção conjunta de tapete impermeável, cortina de injeção e filtro interno, apresentou o melhor desempenho tanto hidráulico quanto estrutural, com baixos níveis de carga total distribuída no maciço e os maiores fatores de segurança. Esse desempenho está alinhado aos achados de Bezerra (2023), que em sua análise de barragens com sistemas de vedação e drenagem completos também identificou significativa elevação dos fatores de segurança e redução expressiva das poropressões internas. Entretanto, assim como apontado nesse mesmo estudo, trata-se de uma solução com custo mais elevado, especialmente devido às operações complexas associadas à execução da cortina de injeção e do tapete impermeável.

Silva e Carvalho (2023), analisaram oito casos reais de barragens brasileiras com diferentes sistemas de vedação e drenagem. A média dos fatores de segurança sob rebaixamento rápido ficou em 1,85, com valores máximos próximos de 2,10 em estruturas com filtros verticais e horizontais efetivos. O desempenho observado no Caso 01 é, portanto, coerente com as boas práticas projetuais nacionais.

O Caso 02, que adota apenas o filtro interno, revelou-se eficiente, tanto na redução da carga total quanto na melhoria da estabilidade. Os resultados obtidos mostram uma significativa redução de carga no interior do maciço, especialmente no talude de jusante. Isso evidencia que a presença do filtro interno é responsável pela maior parcela da estabilidade dos taludes, graças à sua função no alívio das pressões neutras, conforme já destacado por Duncan et al. (2014).

O Caso 04, que combina cortina de injeção e filtro interno, também apresentou desempenho satisfatório. As linhas equipotenciais mostram uma redução das cargas na região da fundação, devido à atuação da cortina, e no interior do maciço, graças ao filtro. Contudo, ainda permanecem cargas ligeiramente mais elevadas na parte superior do talude de montante. Esta configuração se apresenta como uma solução técnica robusta e economicamente mais atrativa que o Caso 01, especialmente para situações onde o controle da percolação na fundação é prioritário.

O Caso 05, composto por tapete impermeável e filtro interno, demonstra um bom controle das cargas totais superficiais e internas. Os resultados demonstram uma redução significativa das cargas no talude de montante, decorrente da ação do tapete, e a drenagem

eficiente no interior do maciço proporcionada pelo filtro. Este comportamento demonstra que o Caso 05 é uma alternativa de ótima relação custo-benefício, reduzindo custos associados à intervenção na fundação e mantendo níveis de estabilidade elevados.

O Caso 03, que utiliza apenas tapete impermeável e cortina de injeção, apresentou desempenho inferior aos casos com filtro. Este resultado confirma que a ausência de drenagem interna compromete significativamente o desempenho da barragem, mesmo quando são adotados mecanismos de vedação superficial e controle na fundação.

De maneira geral, a interpretação dos mapas de carga total também reforça que, nos casos em que não há filtro interno, as cargas internas permanecem elevadas, comprometendo a estabilidade, principalmente do talude de jusante. Por outro lado, observa-se que o rebaixamento rápido impacta o talude de montante, o que é evidenciado pela elevação da carga total nessa região, fenômeno coerente com o comportamento descrito na literatura geotécnica.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência dos dispositivos de controle de percolação na segurança e no desempenho hidráulico de uma barragem de terra. As análises foram realizadas por meio de simulações numéricas de fluxo (SEEP/W) e estabilidade (SLOPE/W), considerando diferentes configurações do sistema de vedação e drenagem.

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que a presença de sistemas de drenagem, particularmente os filtros internos, exerce papel fundamental na estabilidade dos taludes. Os cenários que contaram apenas com sistemas de drenagem (caso 02) apresentaram desempenho satisfatório, com fatores de segurança compatíveis com as normas e redução efetiva das pressões neutras no interior do maciço. Isso evidencia que grande parte da estabilidade da barragem está diretamente associada à eficiência dos filtros no controle das pressões neutras.

Por outro lado, os sistemas de vedação, como o tapete impermeável e a cortina de injeção, demonstraram contribuir de forma complementar, sendo mais eficazes na redução dos fluxos de percolação do que no incremento significativo da estabilidade. O caso 01, que contempla a configuração mais robusta (com filtro interno, tapete impermeável e cortina de injeção) apresentou os melhores indicadores técnicos, tanto em termos de redução da carga hidráulica quanto dos fatores de segurança.

Destaca-se que os casos 04 e 05, que representam soluções intermediárias, apresentaram desempenho técnico bastante satisfatório, tanto na dissipação das pressões neutras quanto na segurança dos taludes, com vantagens econômicas expressivas frente ao caso 01. Estes resultados demonstram que soluções otimizadas, que combinem dispositivos de drenagem eficientes com sistemas de vedação pontual, podem ser tecnicamente viáveis e economicamente mais atrativas, sem comprometer a segurança da estrutura.

Por fim, observa-se que os cenários com ausência de filtros apresentaram os piores desempenhos, tanto em termos de estabilidade quanto de regime de fluxo, reforçando a premissa, amplamente discutida na literatura, de que o controle efetivo da percolação por meio de sistemas de drenagem interna é imprescindível para a segurança e o desempenho de barragens de terra.

Diante dos resultados, conclui-se que, para o tipo de barragem estudado, o uso de filtros internos representa a solução técnica indispensável para garantir a estabilidade e o controle de percolação. A adoção de tapetes impermeáveis e cortinas de injeção deve ser avaliada caso a caso, sendo mais recomendada em situações com exigências específicas quanto à redução de fluxo, seja por critérios ambientais, geológicos ou operacionais.

O presente trabalho também reforça a importância da modelagem numérica como ferramenta de suporte à engenharia geotécnica, permitindo avaliar com rigor técnico o comportamento hidráulico e a estabilidade de estruturas de terra, contribuindo significativamente para projetos mais seguros, econômicos e sustentáveis.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Diante dos resultados obtidos e das limitações inerentes ao presente estudo, sugere-se o desenvolvimento de pesquisas complementares que abordem os seguintes aspectos:

- Avaliação econômica detalhada, com a realização de análises de custo-benefício mais aprofundadas, que incluam os custos reais de implantação dos dispositivos de vedação e drenagem;
- Estudos com modelagens acopladas entre fluxo e deformações (hidromecânica), permitindo avaliar como a variação das poropressões influencia diretamente os deslocamentos e a estabilidade global da barragem;
- Análises de desempenho em diferentes condições geológicas, aplicando a metodologia desenvolvida neste trabalho a barragens implantadas em condições geológicas distintas, como solos colapsíveis, solos expansivos ou fundações em rocha fraturada.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Dispõe sobre a fiscalização e segurança de barragens. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 maio 2017.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Manual de orientação aos empreendedores: guia para elaboração de projetos de barragens. Brasília, 2014.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Manual para elaboração de Plano de Segurança de Barragens. Brasília: ANA, 2014.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução nº 236, de 8 de junho de 2017. Estabelece os critérios e procedimentos para elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jun. 2017.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução nº 1.219, de 7 de novembro de 2019. Estabelece diretrizes para elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 nov. 2019.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução nº 51, de 5 de fevereiro de 2020. Dispõe sobre os procedimentos para apresentação da Declaração de Condição de Estabilidade (DCE). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 fev. 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Resolução nº 149, de 25 de maio de 2021. Estabelece critérios para Relatórios de Inspeção de Segurança Regular (ISR) e Revisões Periódicas de Segurança de Barragens (RPSB). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 maio 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028:1993. Projeto de barragem de rejeitos de mineração. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681:2003. Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, 2003.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122:2019. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187:2003. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028:2006. Projeto, construção e operação de barragens de contenção de rejeitos de mineração. Rio de Janeiro, 2006.

AL-JANABI, Sami; MUHAMMED, Adil; ALI, Falah. Influence of anisotropy on seepage through earth dams using SEEP/W software. *Open Engineering*, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 113–125, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0497>.

AL-MANSORI, Ali; KHASSAF, Harith; JAWAD, Jawad. Numerical modeling of seepage and slope stability analysis in earth dam using GeoStudio software. *International Journal of Engineering and Technology*, v. 9, n. 3, p. 715-720, 2020.

ASDSO – ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS. Dam Failures and Incidents. 2022. Disponível em: <https://damsafety.org>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 13028:2021. *Barragens para acumulação de água – Segurança – Inspeção de segurança regular*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ATHANI, Shivakumar S. et al. Seepage and stability analyses of earth dam using finite element method. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 876–883, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.110>.

AFFONSO, Sandro Luiz de Oliveira. Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento: caso prático. 2004. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

BARRETO, Marcelo de Paula. Análise de inspeções de segurança de barragens no Brasil com base em 133 relatórios de inspeções regulares. 2023. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

BEZERRA, Igor Heitor Galindo. Segurança de barragens. *Revista F&T, Engenharias*, v. 27, n. 123, jun. 2023. DOI: 10.5281/zenodo.8072378.

BRANCO, Rafael; RAMOS, Edgar Alves; SILVA, Mariana Francisca Ferreira; FUSARO, Teresa Cristina. Monitoramento de talude rochoso na UHE Sinop utilizando inclinômetros. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS – SNGB, 34., 2023, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2023.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água, disposição de rejeitos e resíduos industriais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 set. 2010.

CARIM, Adelaide Linhares de Carvalho; COSTA, Débora Pimentel de Carvalho; SOUZA, Natália Pereira de; FUSARO, Teresa Cristina. Medição de deformações com inclinômetros na (re)instrumentação de barragens. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOTECNIA DE

BARRAGENS – SNGB, 32., 2019, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2019. p. 1-14.

CARVALHO, J. A. Dimensionamento de pequenas barragens para irrigação. Lavras: Ed. UFLA, 2008.

CARVALHO, J. A.; CRUZ, P. T.; MAGALHÃES, F. R. Barragens de Terra e Enrocamento – Soluções de Engenharia no Brasil. Rio de Janeiro: CBGB, 1981.

CASAGRANDE, Arthur. Seepage through dams. *Journal of the New England Water Works Association*, v. 51, p. 295–336, 1937.

CASAGRANDE, A; R.E. FADUM. Notes on soil testing for engineering purposes. Havard univ. Grad. School of engineering PUBL. 268, P. 74. 1940.

CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Glossário técnico sobre barragens de terra e enrocamento. 2. ed. São Paulo: CBDB, 2010.

CERQUEIRA, Hélio Márcio Lopes de. Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração. 2017. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CLARKSON, Luke; WILLIAMS, David; SEPPÄLÄ, Jaakko. Real-time monitoring of tailings dams. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 113-127, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1845707>.

COIMBRA, Fernando Joaquim de Souza. Monitoramento de taludes com uso de inclinômetros em estruturas de mineração: uma abordagem prática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 2019, Salvador. *Anais...* Salvador: ABMS, 2019.

CRUZ, Paulo Tadeu. Barragens: histórias de acidentes e lições aprendidas. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CRUZ, Paulo Teixeira da. 100 barragens brasileiras. São Paulo: Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), 2004.

COSTA, Francisco José da. Estudo de caso: rompimento da barragem Algodões I – PI. 2010. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/5231>.

DARCY, H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau. Paris: Victor Dalmont, 1856.

DAS, Braja M. Fundamentos de engenharia geotécnica. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

DIVINO, Paula Luciana. Comportamento de enrocamentos em barragens – Estudo de caso da barragem de Emborcação. 2010. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; WONG, K. S. *Soil Strength and Slope Stability*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

DUNNICLIFF, John. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. New York: Wiley, 1993.

EU – EUROPEAN UNION. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, L 327, p. 1-72, 22 Dec. 2000.

FELL, R. et al. *Geotechnical Engineering of Dams*. 2. ed. London: CRC Press, 2014. (Livro amplamente utilizado como base para conceitos de percolação, estabilidade e instrumentação de barragens.)

FEMA – FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Federal Guidelines for Dam Safety. Washington, D.C., 2004.

FEMA – FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Federal Guidelines for Dam Safety: Risk Management. FEMA P-1025. Washington, DC, 2015.

FEMA – FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Federal Guidelines for Dam Safety. Washington, DC, 2023.

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

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 37, p. 1000–1024, 2000. <https://doi.org/10.1139/t00-030>

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 103, n. 5, p. 447–466, 1977.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: Wiley-Interscience, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Q. *Equations for the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, v. 31, n. 4, p. 521–532, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1139/t94-061>.

FU, Xiao; GU, Chong-Shi; SU, Huai-Zhi; QIN, Xiang-Nan. Risk analysis of earth-rock dam failures based on fuzzy event tree method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, n. 886, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050886>

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. SEEP/W 2012 – Modeling seepage through soil: User's guide. Calgary, Alberta, Canada, 2015.

GEOSLOPE INTERNATIONAL LTD. SEEP/W 2021: Theory and Background. Calgary: GeoSlope International Ltd., 2021.

HARTFORD, D. N.; BAECHER, G. B. Risk and uncertainty in dam safety. London: Thomas Telford, 2004.

HUSSIEN, Moayad et al. Numerical analysis of seepage and stability for an earth dam. International Journal of Engineering & Technology, v. 9, n. 3, p. 613–621, 2020.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Bulletin 55 – Dam Safety Guidelines: Dam Safety Management. Paris, 1986.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Bulletin 82 – Selection of Design Flood. Paris, 1992.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Bulletin 98 – Operation of Spillways. Paris, 1995.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Bulletin 130 – Risk Assessment in Dam Safety Management. Paris, 2005.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Bulletin 154 – Dam Safety Management: Operational Phase of Dams. Paris, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14688-2: Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 2: Principles for a classification. Geneva, 2017.

JAROUCHE, A. Peculiaridades dos arenitos na construção de barragens. In: SEMINÁRIO DE BARRAGENS EM ARENITOS BRANDOS, 1., São Paulo, 2011. Anais [...]. São Paulo: CBDB, 2011.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1979.

LIMA, J. R. C. Avaliação do comportamento hidráulico de misturas de solo laterítico com areia para uso em barragens de terra. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

LIMA, Paulo Henrique; MOREIRA, Rafael; SOUZA, Gustavo; FUSARO, Teresa. Monitoramento de deformações superficiais em barragens com o uso combinado de InSAR e Estações Totais Robóticas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS – SNGB, 34., 2023, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2023.

LIMA, José Nilton dos Santos; SILVA, Francisco de Assis de Sousa. Análise das causas e consequências do rompimento da Barragem de Camará no Estado da Paraíba. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/1120>.

LOPES, Mário; ABDELHAFID, Abdelmalek; AL-QADAH, Sadiq. Computational modeling of seepage flow in embankment dams considering anisotropic soil behavior. *Water*, v. 12, n. 742, p. 1–15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030742>.

MARANGON, J. A. Barragens de terra e enrocamento: critérios de projeto e construção. Brasília: Eletrobrás, 2004.

MARQUES, R. G. Estudo técnico sobre estabilidade de taludes em barragens de terra. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

MASSAD, Francisco. Geotecnica: ensaios e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MIRANDA, Stéfano de Amorim. Análise paramétrica do regime de fluxo numa barragem de terra assente em solos permeáveis: estudo de caso PCH Canoa Quebrada. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

MODESTO, B. Análise paramétrica do comportamento de uma barragem de terra sob condições de fluxo permanente e transiente. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH, 2019.

MODERTO, B.; PRETTO, J. H. F.; PEDROZZO, C. Análise das condições de fluxo em uma barragem de terra. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH, 2019.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>. Acesso em: 02 maio 2025.

MOHR, C.; COULOMB, C. A. *Recherches sur la meilleure manière de diriger les ponts volants et les moyens de les établir promptement*. Paris: Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1871.

NIEBLE, Carlos Manoel; GUIDICINI, Guido; MELLO, Luiz Guilherme de. Barragens em arenitos brandos no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

NOBARI, E. S.; DUNCAN, J. M. Effect of Reservoir Filling on Stresses and Movements in Earth and Rockfill Dams. Report No. UCB/GT/72-02. Berkeley: University of California, 1972.

OLIVEIRA, J. B. Critérios de segurança aplicados à gestão de barragens no Brasil: aspectos técnicos e normativos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA, 20., 2023. Anais [...]. Curitiba: ABMS, 2023.

PIEROZAN, L. M. Análise experimental de filtros granulares em barragens de terra com base no desempenho hidráulico. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

RAPOSO, R. S. P. Análise numérica do comportamento hidráulico de barragens de terra. 2016. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

RODRIGUES, M. F.; ALBUQUERQUE, L. S.; MORAIS, R. A. Variações sazonais de sucção em solos compactados utilizados em barragens de terra. *Revista Brasileira de Geotecnica*, São Paulo, v. 32, n. 2, 2022.

ROSA, João Guimarães. *Grande Sertão: Veredas*. 3. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2001.

SALMAN, Mohammed Mohsin; ABRAHEIM, Ahmed Kamil; AL-ATTABI, Ali Mohammed Ali Naji. Stability analysis of Hub dam under rapid drawdown. *Open Engineering*, v. 14, n. 1, p. 20220497, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0497>.

SANTOS, L. C. Análise de dados piezométricos para avaliação da segurança de barragens de rejeitos: estudo de caso da Barragem do Germano – Mariana – MG. 2019. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

SANTOS, D. P. Análise de estabilidade de taludes em barragens de terra por meio de modelagem numérica utilizando o software Geostudio. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

SEQUENT. SLOPE/W 2023 – Stability modeling with GeoStudio: User's guide. Christchurch, New Zealand: Sequent Limited, 2023.

Silva, A. P., & Carvalho, R. C. (2023). “Análise de estabilidade de barragens sob rebaixamento rápido: estudo comparativo entre métodos acoplados.” *Revista Brasileira de Geotecnica*, 168(1), 45–58.

SILVA, Dayana Santos. Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens. 2016. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SILVEIRA, Armando. Instrumentação e segurança de barragens. 2. ed. Belo Horizonte: CETEC, 2006. 295 p.

SMIDERLE, José Anderson. Análise dos dados de instrumentação da barragem de Itaúba – MT. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2014.

SOUZA, F. L., Araújo, R. M., & Moura, D. A. (2020). “Estudo paramétrico de estabilidade em barragens de terra sob rebaixamento rápido com SLOPE/W.” *Anais do COBRAMSEG 2020*.

SOUZA, R. C. Estudo de fundações em solos aluvionares para barragens de terra no Brasil Central. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

TERZAGHI, K. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1943.

USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. EM 1110-2-2300 – Earth and Rock-Fill Dams: General Design and Construction Considerations. Washington, D.C., 2004.

USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. ER 1110-2-1156 – Safety of Dams – Policy and Procedures. Washington, D.C., 2014.

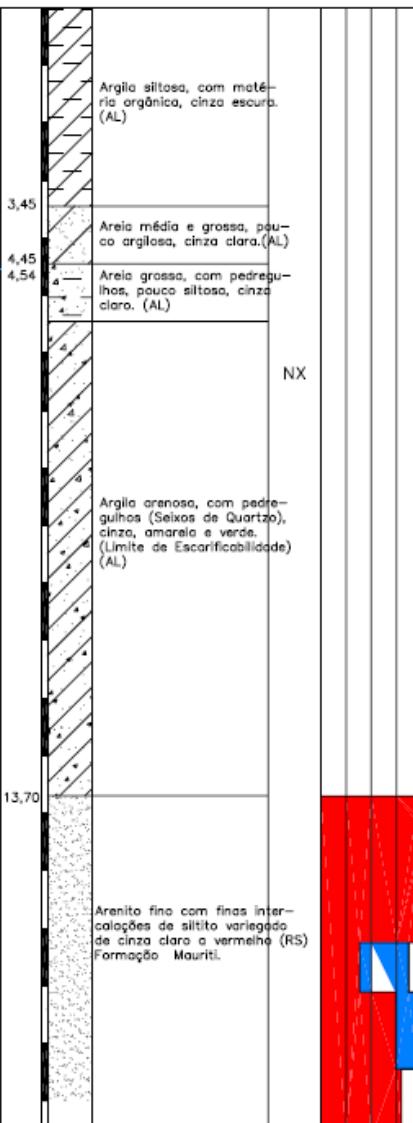
UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). Design of small dams. 3. ed. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 2002.

VAN GENUCHTEN, M. T. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

VIEIRA, J. M. Estudo do comportamento de filtros internos aplicados a barragens de terra. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

ZHANG, Lihua et al. Seepage and stability analysis of a tailings dam considering variation of beach length and upstream slope angle. Water, v. 12, n. 742, p. 1–15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030742>.

ANEXO A – RESULTADO DAS SONDAGENS

DATA E NA (m)	PROF. (m)	PERFIL	DESCRÍÇÃO DO MATERIAL	REVEST. Ø	RECUPERAÇÃO % EFETIVA R.Q.D.	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE COERÊNCIA	GRAU DE FRATURAMENTO Nº DE FRATURAS m	RESISTÊNCIA PENETRAÇÃO SOLO	ENSAIO DE PENETRAÇÃO (SP)											PROF. TRECHO (m)										
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10												
23/02/2001	N.A.	NX	 <p>Argila siltosa, com material orgânico, cinza escura. (AL)</p> <p>Areia média e grossa, pouco argilosa, cinza clara. (AL)</p> <p>Areia grossa, com pedregulhos, pouco siltoso, cinza clara. (AL)</p> <p>Argila arenosa, com pedregulhos (Seixos de Quartzo), cinza, amarelo e verde. (Límite de Escravagabilidade) (AL)</p> <p>Arenito fino com finas intercalações de siltito variegado de cinza clara a vermelho (RS) Formação Mauriti.</p>							3											1										
																				2,00											
										3										2											
																				3											
										4										4											
										6										4,50											
										19										5											
																				6,00											
																				8											
																				7											
										10/4										8											
																				9											
										10/5										10											
										12/5										11											
										**										12											
										13/4										13											
										**										14											
										16/9										15											
																				16											
																				17											
																				18											
																				19											
NOTA:												PRESSÃO EFETIVA kg/cm ²																			
Ensolo de Infiltração (cm/s)												2	3	4	5	6	7	8	9	10	Período de infiltração (Press. Máx.)										
** Para os primeiros 15cm												0,1																			
												ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA																			
												1	2	3	4	5	6	7													

