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

DOUGLAS NASCIMENTO BRANDÃO

DEFINIÇÃO DE NÍVEIS DE CONTROLE EM BARRAGEM DE MINERAÇÃO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES MODOS DE FALHA POR ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS DE FLUXO EM ESTADO ESTACIONÁRIO

Recife
2025

DOUGLAS NASCIMENTO BRANDÃO

DEFINIÇÃO DE NÍVEIS DE CONTROLE EM BARRAGEM DE MINERAÇÃO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES MODOS DE FALHA POR ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS DE FLUXO EM ESTADO ESTACIONÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Geotecnia.

Orientador: Leonardo José do Nascimento Guimarães

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Brandão, Douglas Nascimento.
   Definição de níveis de controle em barragem de mineração em função de diferentes modos de falha por análise de elementos finitos de fluxo em estado estacionário / Douglas Nascimento Brandão. - Recife, 2025.
   177f.: il.

   Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.
   Orientação: Leonardo José do Nascimento Guimarães.
   Inclui referências.

   1. Barragem de mineração; 2. Níveis de controle; 3. Modos de falha. I. Guimarães, Leonardo José do Nascimento. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

DOUGLAS NASCIMENTO BRANDÃO

DEFINIÇÃO DE NÍVEIS DE CONTROLE EM BARRAGEM DE MINERAÇÃO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES MODOS DE FALHA POR ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS DE FLUXO EM ESTADO ESTACIONÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Geotecnia.

Aprovada em 25/03/2025

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães – UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (examiandor interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões (examinador externo)
Universidade Federal de Moinas Gerais

participação por videoconferência
Prof.ª Dr.ª Débora Cristina Almeida de Assis (examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus Pai, pela sua constante bondade e misericórdia sobre minha vida. Agradeço a Jesus Cristo por me aliviar e me conceder descanso em seu governo. Agradeço ao Espírito Santo por me revestir de forças para cada etapa desse trabalho.

Agradeço aos meus pais, Adriano e Izabel Brandão, que sempre proporcionaram o melhores incentivos e ambiente para os meus estudos, além de amor e cuidado. Estendo também a toda minha família e irmãos na fé que me acompanham em cada passo. Cito meu querido irmão Lucas Brandão, querido amigo Raphael Viera e querida namorada Victoria Gonçalves.

Agradeço ao professor Leonardo Guimarães pelo tempo disponibilizado, pela confiança, exemplo de profissional e conhecimento compartilhado no processo de orientação dessa dissertação.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, especialmente aos professores da área de geotecnia pela clareza em transmitir o conhecimento e por concederem constante inspiração através de suas aulas.

Agradeço a banca examinadora, pela disponibilidade e disposição em contribuir com esse trabalho.

Agradeço a TPF Engenharia, nas pessoas de Luana Pereira e Laura Cunha, por me proporcionarem um ambiente não só de trabalho inovador, mas de constante aprendizado, evolução e incentivo acadêmico.

‘Venham a mim todos vocês que estão cansados e sobrecarregados, e eu os aliviarei. Tomem sobre vocês o meu jugo e aprendam de mim, porque sou manso e humilde de coração; e vocês acharão descanso para a sua alma. Porque o meu jugo é suave, e o meu fardo é leve.’
Jesus Cristo

(BÍBLIA SAGRADA. Nova Almeida Atualizada. Tradução da Sociedade Bíblica do Brasil. São Paulo, Brasil, 2017.)

RESUMO

As barragens de mineração são estruturas destinadas a conter rejeitos e sedimentos provenientes da mineração. No Brasil, os desastres de Brumadinho e Mariana despertaram a atenção para a gestão, segurança e monitoramento dessas estruturas. A implementação de instrumentação é frequente, e o estabelecimento de níveis de controle para auxiliar na interpretação de suas leituras em relação a segurança da barragem é uma exigência legal. Contudo, não existe na literatura técnica, nacional ou internacional, uma metodologia única para esse estabelecimento, e as abordagens clássicas concentram-se em um único modo de falha: a estabilidade estática. Essa abordagem é insuficiente, pois diversos outros modos de falha podem ocorrer, tais como galgamento, erosão interna e liquefação. Em uma barragem real, observou-se que elevados fatores de segurança por estabilidade podem coexistir com outras anomalias associadas a infiltração ou piping, gerando uma interpretação inadequada quanto à segurança da barragem. A fim de superar essas limitações, foi aplicada uma avaliação de segurança considerando modos de falha críveis, zonas de atenção da barragem e comportamento das leituras do sistema de instrumentação. Por meio de modelagem numérica de fluxo em estado estacionário por análise de elementos finitos, fez-se a calibração e avaliação de pontos de atenção adotando critérios de operacionalidade baseados na colmatação do sistema de drenagem interna em 75%, 85% e 95%. Os ajustes nos níveis de controle resultaram em valores que abrangem falhas pelos métodos mencionados por estabilidade, infiltração, piping e ruptura por fundação, além de englobar o monitoramento da operacionalidade segura da barragem. Foi constatada também a influência da tridimensionalidade da barragem, dificultando a modelagem das ombreiras. Apesar das contribuições obtidas no presente estudo, a metodologia pode não ser replicável a outras barragens, dada a necessidade de considerar as especificidades estruturais de cada estrutura. Contudo, os princípios apresentados para o estabelecimento de níveis de controle devem incluir a avaliação de diferentes modos de falha, zonas de atenção específicas, limitações dos modelos e interpretações baseadas em dados históricos da instrumentação. Esses elementos são fundamentais para um processo mais robusto e confiável de estabelecimento de níveis de controle.

Palavras-chave: Barragem de Mineração; Níveis de Controle; Modos de Falha.

ABSTRACT

Mining dams are structures designed to contain tailings and sediments from mining activities. In Brazil, the disasters in Brumadinho and Mariana have drawn attention to the management, safety, and monitoring of these structures. The implementation of instrumentation is common, and the establishment of control levels to assist in the interpretation of readings related to dam safety is a legal requirement. However, there is no single methodology in the national or international technical literature for this establishment, and classical approaches focus on a single failure mode: static stability. This approach is insufficient because several other failure modes can occur, such as overtopping, internal erosion, and liquefaction. In a real dam, high safety factors for stability may coexist with other anomalies related to infiltration or piping, leading to inadequate interpretations of the dam's safety. To overcome these limitations, a safety assessment was applied, considering credible failure modes, areas of concern within the dam, and the behavior of instrumentation system readings. Through numerical modeling of steady-state flow using finite element analysis, calibration and assessment of attention points were carried out, adopting operationality criteria based on the clogging of the internal drainage system at 75%, 85%, and 95%. Adjustments to the control levels resulted in values covering failures by methods mentioned for stability, infiltration, piping, and foundation rupture, while also encompassing the monitoring of the dam's safe operability. The influence of the dam's three-dimensionality was also noted, complicating the modeling of the abutments. Despite the contributions made in this study, the methodology may not be replicable for other dams due to the need to consider the structural specifics of each structure. However, the principles presented for the establishment of control levels should include the evaluation of different failure modes, specific areas of concern, model limitations, and interpretations based on historical instrumentation data. These elements are essential for a more robust and reliable control level establishment process.

Keywords: Mining Dam; Control Levels; Failure Modes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Barragem de mineração alvo da dissertação - MG 23
Figura 3.2 - Método de Alteamento por Montante 26
Figura 3.3 - Método de Alteamento a Jusante.....27
Figura 3.4 - Método de alteamento de linha do centro 28
Figura 3.5 - Comparativo volumétrico da barragem de mineração conforme método construtivo: (a) Montante, (b) Jusante e (c) Linha de centro. 29
Figura 3.6 - a) Análise por equilíbrio limite das duas metodologias construtivas, situação hipotética sem percolação e poro pressão b) Análise numérica das duas metodologias construtivas, situação hipotética sem percolação e poro pressão. 30
Figura 3.7 - a) Análise por equilíbrio limite com percolação e poro pressão. b) Análise numérica com percolação e poro pressão.....31
Figura 3.8 - Perda de carga devido ao fluxo de água através do solo 33
Figura 3.9 - Natureza de variação da velocidade com o gradiente hidráulico 34
Figura 3.10 - Fluxo de água acima da linha freática em uma barragem de aterro. ...37
Figura 3.11 - Efeito da compactação na estrutura de solo argiloso.....40
Figura 3.12 - Efeito da compactação permeabilidade de solo argiloso (a) em relação ao peso especifico (b) em relação a permeabilidade 40
Figura 3.13 - Cenário de linha de base usando interpolação linear de níveis freáticos entre piezômetros.....42
Figura 3.14 - Comparação de linhas freáticas em estado estacionário para K_h/K_v = 1, 10 e 100 e a) elevação máxima da água de 25 m b) elevação máxima da água de 50 m 43
Figura 3.15 - Visão geral histórica e de gravidade das falhas de barragens de rejeitos. 45
Figura 3.16 - Eventos de falha ao longo do tempo por pais 47
Figura 3.17 - Elevação próximo ao pé do talude jusante de uma barragem, causado por fluxo de água.....49
Figura 3.18 – Ruptura da camada da fundação causado por fluxo de água 50
Figura 3.19 - Diagrama esquemático de (a) galgamento de fluxo continua e (b) galgamento por ondas.....51
Figura 3.20 - Estágios do processo erosivo mostrando: (a) Erosão interna e desenvolvimento do ponto úmido; (b) evolução da tubulação(buraco) no talude; (c)

alargamento do furo da tubulação; (d) Brecha temporária com o colapso da crista; (e) Formação da brecha final.....52
Figura 3.21 - Fator de Segurança em relação a piezometria e altura em barragens 56
Figura 3.22 - Boletim Sísmico do Centro de Sismologia da USP 57
Figura 3.23 - (a) Mapa da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para rocha (b) Mapa preliminar de acelerações máximas dos solos para um tempo de retorno de 475 anos 58
Figura 3.24 - (a) Croqui do medidor de vazão vertedor triangular e (b) Registro fotográfico.....64
Figura 3.25 - (a) Croqui da Calha Pashall e (b) Registro fotográfico. 65
Figura 3.26 - Fita graduada para medição de nível freático 66
Figura 3.27 - Perfil típico de um indicador de nível d'água.....67
Figura 3.28 - Esquema de um piezômetro de tubo aberto/casa grande.....68
Figura 3.29 - Esquema(a) e detalhamento(b) do Piezômetro Pneumático () 69
Figura 3.30 - Esquema do Piezômetro Elétrico de Resistência (.....71
Figura 3.31 - Esquema do Piezômetro de Corda Vibrante.....72
Figura 3.32 - Exemplo de TARPs com indicadores de desempenho relacionados a controles críticos e ações pré-definidas para diversos níveis de risco. 79
Figura 3.33 - Fluxograma utilizado na definição dos Níveis de Alerta de Tendências e sua correlação com os TARPs 80
Figura 3.34 - Proposta de nomenclatura para valores de controle para instrumentação de barragens utilizado métodos determinísticos e estatísticos.....84
Figura 3.35 - Zonas delimitadas pelos valores de controle da instrumentação considerando método integrado, determinístico e estatístico, para estabelecimento de níveis de controle. 85
Figura 3.36 - Retroanálise de níveis de controle com base em observação visual ...86
Figura 4.1 - Localização da Barragem Estudo com curvas topográficas.....87
Figura 4.2 - Maciço Inicial.....88
Figura 4.3 - Seção Central Atual 89
Figura 4.4 - Vista aérea da Barragem Estudo com locação de seções.....90
Figura 4.5 - Seção Ombreira Direita (D-D') 91
Figura 4.6 - Seção Ombreira Esquerda (E-E').....91
Figura 4.7 - Mapa de Locação de Sondagens realizadas 93
Figura 4.8 - Locação em planta da instrumentação da Barragem Estudo.....99

Figura 4.9 - Seção Instrumentada – Central (C-C') 100
Figura 4.10 - Seção Instrumentada - Ombreira Direita (D-D') 100
Figura 4.11 - Seção Instrumentada - Ombreira Esquerda (E-E') 101
Figura 4.12 - (a) Leituras do instrumento NA01 com salto devido à atualização topográfica; (b) Gráfico ajustado com cota unificada para todo o histórico. 102
Figura 4.13 - Processo de compatibilização de leituras para o instrumento NA07, considerando a diferença de cota antes e após a calibração da equação do sensor. 104
Figura 4.14 - Gráfico de leituras da régua do reservatório RR01 107
Figura 4.15 - Gráficos das leituras dos indicadores de nível de água locados na crista (NA01, NA02, NA03 e NA04) 109
Figura 4.16 - Gráficos das leituras dos indicadores de nível de água locados na berma (NA05 ao NA09) 111
Figura 4.17 - Gráfico de leituras do indicador de nível d'água NA10 112
Figura 4.18 - Gráficos das leituras dos piezômetros locados na crista (PZ01 ao PZ03) 114
Figura 4.19 - Gráficos das leituras dos piezômetros locados na berma (PZ04 ao PZ08) 116
Figura 4.20 - Gráficos das leituras dos piezômetros locados no pé (PZ09 e PZ10) e demais locações (PZ11 e PZ12) 118
Figura 4.21 - Gráfico de leituras do medidor de vazão MV01 119
Figura 4.22 - Seção com faixas freáticas máximas e mínimas 126
Figura 4.23 - (a) Esquemática das faixas adotadas para análise estática de superfície freática e definição de média normalizada (b) exemplo de aplicação para média normalizada de 0,3 (c) faixa de freática por distribuição normal (d) faixa de freática por distribuição exponencial 126
Figura 4.24 - Gráfico de sensibilidade variando coesão, ângulo de atrito, peso específico e superfície freática 127
Figura 4.25 - Análise de Estabilidade e Percolação em Cenário Crítico (colmatação total do filtro e nível do reservatório correspondente a crista) 130
Figura 5.1 - Freática medida pelos indicadores de nível de água 135
Figura 5.2 - Poropressão medida do aterro 136
Figura 5.3 - Poropressão medida da fundação 137
Figura 5.4 - Comparação das leituras dos instrumentos localizados na crista. 138

Figura 5.5 - Distância entre o ponto de medição do NA09 e a seção central da barragem. 139
Figura 5.6 - Traçado do nível freático com base na análise conjunta dos instrumentos de medição. 140
Figura 5.7 - Fator de segurança da análise de sensibilidade para a freática média. 141
Figura 5.8 - Gráfico com os resultados da análise de sensibilidade 141
Figura 5.9 - Malha de elementos finitos e condições de contorno para análise de percolação 143
Figura 5.10 - Modelo de percolação inicial com permeabilidades médias 143
Figura 5.11 - Comparativo entre modelo de percolação e dados de instrumentação 144
Figura 5.12 - Resultado Calibração 1: com foco na zona 1 146
Figura 5.13 - Resultado Calibração 2: com foco na zona 2 147
Figura 5.14 - Resultado da Calibração 3: com foco geral 147
Figura 5.15 - Resultado Calibração Final 149
Figura 5.16 - Esquema do comportamento de concentração de fluxo na Barragem Estudo. 151
Figura 5.17 - Análise de percolação e estabilidade da seção C-C' correspondente a cenário de nível de atenção 154
Figura 5.18 - Análise de percolação e estabilidade da seção C-C' correspondente a cenário de nível de alerta 155
Figura 5.19 - Análise de percolação e estabilidade da seção C-C' correspondente a cenário de nível de emergência 156
Figura 5.20 - Seção central instrumentada com níveis de controles obtidos por percolação 157
Figura 5.21 - Gráfico de leituras de instrumentos (PZ02, PZ03, NA02 e NA05) com níveis de controle definidos 160
Figura 5.22 - Gráfico de leituras de instrumentos (NA06, PZ05, NA07 e PZ07) com níveis de controle definidos 161
Figura 5.23 - Gráfico de leituras de instrumentos (PZ06, NA09, PZ09 E PZ10) com níveis de controle definidos 162
Figura 5.24 - Traçado de seções de ombreira em relação a fluxo esperado na Barragem Estudo 163

Figura 5.25 - Seção Ombreira Direita D-D’ com níveis de controles obtidos por percolação.....164
Figura 5.26 - Seção Ombreira Esquerda E-E’ com níveis de controles obtidos por percolação.....164
Figura 5.27 - Gráfico de leituras de instrumentos da ombreira com níveis de controle definidos.....165
Figura 5.28 - Gráfico de leituras dos indicadores de nível de água (NA03 e NA10) com níveis de controle definidos.....167
Figura 5.29 - Gráfico de leituras dos piezômetros (PZ11 e PZ12) com níveis de controle definidos.....167
Figura 5.30 - Gráfico de leituras do medidor de vazão (MV01) com níveis de controle definidos.....167

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Acidentes com barragens de mineração no Brasil nos últimos 40 anos. 23
Tabela 3.2 - Resumo das vantagens e desvantagens dos métodos construtivos de barragens de rejeito 28
Tabela 3.3 - Comparação entre as principais características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos. 29
Tabela 3.4 - Resumo dos resultados da avaliação dos dois métodos construtivos, considerando hipótese sem percolação e poro pressão. 31
Tabela 3.5 - Resumo dos resultados da avaliação dos dois métodos construtivos, considerando hipótese com percolação e poro pressão. 31
Tabela 3.6 - Fatores de segurança calculados para vários cenários de infiltração ...43
Tabela 3.7- Falhas de contenção devido a problemas com gestão da água em barragens de rejeito 44
Tabela 3.8 - Significado do fator de segurança em relação a estabilidade 54
Tabela 3.9 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração 54
Tabela 3.10 - Classificação da utilidade dos dados de monitoramento para identificação de diferentes modos de falha. 63
Tabela 3.11 - Tabela Resumo do Medidor de Vazão de Face Plana 64
Tabela 3.12 - Tabela Resumo da Calha Pashall 65
Tabela 3.13 - Tabela Resumo de Indicador de Nível de Água 66
Tabela 3.14 - Tabela Resumo Piezômetro de Casa Grande 69
Tabela 3.15 - Tabela Resumo Piezômetros Pneumáticos.....70
Tabela 3.16 - Tabela Resumo Piezômetro Elétrico 71
Tabela 3.17 - Tabela Resumo Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante 72
Tabela 3.18 - Principais causas de comportamento insatisfatório de barragens e sistemas de observação (CRUZ,2003/ Adaptado) 74
Tabela 4.1 - Principais Características Técnicas.....89
Tabela 4.2 - Resumo dos parâmetros de resistência adotados 92
Tabela 4.3 - Resumo dos resultados de condutividade Hidráulica dos Materiais.....96
Tabela 4.4 - Informações gerais dos instrumentos de monitoramento 97
Tabela 4.5 - Comparativo entre diferenças de leituras em relação a calibração e cotas de topo em relação a atualização topográfica para instrumentos automáticos 103

Tabela 4.6 - Resumo das leituras da régua do reservatorio, indicadores de nível de água e piezometros.....105
Tabela 4.7 - Resumo das leituras do medidor de vazão 106
Tabela 4.8 - Condições de contorno hidráulicas do Slide 2.....124
Tabela 4.9 - Modos de falha factíveis para Barragem Estudo em relação a instrumentação disponível.....129
Tabela 4.10 - Síntese das características da cenários de nível avaliadas 133
Tabela 5.1 - Calibração C1.....145
Tabela 5.2 - Calibração C2.....146
Tabela 5.3 - Calibração C3.....147
Tabela 5.4 - Parâmetros de permeabilidade adotados no modelo após calibração 148
Tabela 5.5 - Síntese dos cenários de análise e resultados correspondentes.....153
Tabela 5.6 - Nível de controle obtidos por percolação e leitura máxima histórica para cada instrumento.....158
Tabela 5.7 - Nível de controle obtidos por percolação e leitura máxima histórica para cada instrumento.....158
Tabela 5.8 - Nível de controle obtidos por percolação e níveis de controle adotados considerando critério de leitura máxima. 165
Tabela 5.9 - Níveis de Controle estabelecidos com base em desvio padrão 166

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
2 OBJETIVO 21
2.1 OBJETIVO GERAL 21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
3.1 BARRAGENS DE MINERAÇÃO 22
3.1.1 Métodos construtivos 25
3.2 FLUXO DE ÁGUA EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO 32
3.2.1 Lei de Darcy 32
3.2.2 Fluxo de água em meio poroso 35
3.2.3 Fatores que Influência o valor de permeabilidade 38
3.2.4 Efeitos da compactação na permeabilidade de solos coesivos 39
3.2.5 Aplicação do fluxo em barragens de mineração 41
3.2.6 Problemas da gestão de água em barragens de mineração 43
3.3 MODOS DE FALHA 45
3.3.1 Falha na Fundação 48
3.3.2 Galgamento 50
3.3.3 Erosão interna 51
3.3.4 Liquefação estática 53
3.3.5 Instabilização estática 54
3.3.6 Evento Sismo 56
3.4 MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO 58
3.4.1 Instrumentação de Monitoramento em Barragens de Rejeito 59
3.4.2 Legislação associada a Instrumentação 61
3.4.3 Modos de Falha associado a Instrumentação 61
3.4.4 Tipos de instrumentos 63
3.4.5 Localização dos Instrumentos 72
3.4.6 Limitações, avanços e atuação da instrumentação 73
3.4.7 Custos de um plano de instrumentação de barragens 75
3.5 NÍVEIS DE CONTROLE EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO 75
3.5.1 Conceituação de Níveis de Controle 76
3.5.2 Metodologias para determinação de Níveis de Controle 79

4 MATERIAIS E MÉTODOS 87
4.1 DESCRIÇÃO DA BARRAGEM DE ESTUDO 87
4.1.1 Características gerais da barragem 87
4.1.2 Seções Geológico-Geotécnicas 89
4.2 CARACTERIZAÇÃO E PARÂMETROS DOS MATERIAIS 91
4.2.1 Parâmetros de Resistência 94
4.2.2 Parâmetros de Permeabilidade 96
4.3 SISTEMA DE AUSCULTAÇÃO E DADOS DE MONITORAMENTO 97
4.3.1 Locação dos Instrumentos 97
4.3.2 Compatibilização das leituras 101
4.4 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO 104
4.4.1 Nível do Reservatório 106
4.4.2 Análise dos Indicadores de Nível de Água 107
4.4.3 Análise dos Piezométricos 112
4.4.4 Medidor de Vazão 119
4.4.5 Análise Crítica dos Dados de Monitoramento 119
4.5 SOFTWARE SLIDE2 ROCSCIENCE 121
4.5.1 Análise de estabilidade por equilíbrio limite 122
4.5.2 Percolação de Água por Elementos Finitos 123
4.5.3 Análise de sensibilidade 125
4.6 METODOLOGIA DE DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE POR MODO DE FALHA 127
4.6.1 Modos de falha não factíveis 127
4.6.2 Modos de falha factíveis em relação parâmetros medidos 128
4.6.3 Metodologia 129
5 RESULTADOS 134
5.1 COMPORTAMENTO DA PERCOLAÇÃO MEDIDA PELA INSTRUMENTAÇÃO 134
5.1.1 Avalição do nível freático 135
5.1.2 Avaliação da poropressão do aterro 135
5.1.3 Avaliação da poropressão da fundação 136
5.1.4 Avaliação conjunta 137
5.2 MODELO DE PERCOLAÇÃO 142
5.2.1 Calibração em relação a Zona 1 145

5.2.2 Calibração em relação a Zona 2 146
5.2.3 Considerações a respeito da calibração final 150
5.3 ESTABELECIMENTO NÍVEIS DE CONTROLE 152
5.3.1 Seção Central (C-C'). 153
5.3.2 Seções de Ombreira 163
5.3.3 Demais instrumentações 166
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES 168
6.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA E CONCLUSÃO 168
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 169
REFERÊNCIAS 171

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Ávila (2012), as barragens de mineração têm sido utilizadas no Brasil desde a década de 1930. No entanto, os acidentes ocorridos nos últimos anos geraram uma crescente exigência de segurança por parte da sociedade, a qual impulsionou avanços significativos na política de segurança voltada às barragens de mineração. Essa mobilização social resultou em legislações mais rigorosas, desenvolvimento de tecnologias avançadas na engenharia de barragens e aprimoramento das práticas de monitoramento e gestão.

A exemplo disso, a Resolução nº 95 da Agência Nacional de Mineração (ANM) estabelece critérios nacionais para a classificação das barragens de mineração quanto ao dano potencial associado e à categoria de risco. Entre os aspectos considerados nesses critérios estão a existência de instrumentação nas barragens, a realização de monitoramento contínuo e a análise regular de segurança.

Nesse cenário, observa-se um aumento na implementação de sistemas de instrumentação, especialmente em barragens de grande porte, acompanhados por uma ampliação nos parâmetros monitorados como recursos de prevenção de risco. A utilização de instrumentos automatizados também tem possibilitado a coleta e o processamento de grandes volumes de dados. Contudo, Clarkson (2021) ressalta a importância de diferenciar dados processados de dados interpretados, enfatizando que a interpretação adequada dos dados é fundamental para garantir a segurança das barragens.

Uma das principais ferramentas que auxiliam na interpretação de dados de monitoramento são as Cartas de Controle. Esses documentos definem níveis normais e críticos de leitura para cada instrumento, considerando as condições estruturais da barragem. Gomes et al. (2024) destacam que, apesar da importância dessas cartas, ainda não existe uma padronização normativa para sua elaboração. Comumente, o estabelecimento das Cartas de Controle baseia-se na avaliação da estabilidade estática das barragens, considerando a variação do nível freático e definindo níveis de controle para piezômetros e indicadores de nível de água, geralmente com foco em um único modo de falha.

No entanto, essa abordagem pode ser desfavorável à segurança em situações em que outros modos de falha, como a erosão interna, sejam mais prováveis na estrutura. Assim, torna-se essencial realizar análises que integrem parâmetros geotécnicos específicos da barragem com dados obtidos por meio da instrumentação, possibilitando um monitoramento mais completo e a definição de níveis de controle que reflitam com maior precisão os riscos existentes. Nesse contexto, análises críticas de segurança que considerem diferentes modos de falha são indispensáveis para garantir uma gestão eficaz e a integridade estrutural das barragens.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Diante da necessidade de garantir a segurança em barragens de mineração, o desenvolvimento de recursos de gestão e monitoramento é essencial. Nesse contexto, faz-se necessário a adoção de critérios de segurança segundo as condições especificas de cada barragem monitorada e modos de falhas, com vista a prevenção de acidentes e atendimento a requisitos legais.

Nesse contexto, o presente estudo visa aplicar conceitos geotécnicos e perspectiva de modos de falha a análises dos dados de instrumentação. E a partir disso, estabelecer critérios de avaliação e níveis de controle para os instrumentos pertencentes ao seu sistema de monitoramento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Busca por metodologias de carta de risco propostas no meio técnico e acadêmico, nacionalmente e internacionalmente, voltadas a barragem de mineração;
- Realizar avaliação do comportamento do nível freático medida pela instrumentação em relação a seção crítica da barragem, localizando possíveis zonas de fragilidade e avaliando a condição do sistema de drenagem interno;
- Calibrar o modelo de percolação com vista aos dados de instrumentação visando utilizar um modelo valido para condição de campo apontando limitações da modelagem 2D;
- Estabelecer níveis de controle para a estrutura baseada em modos de falha criveis para a barragem, integrando a análise de estabilidade e percolação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o conceito de barragens de mineração, percolação da água nessas estruturas, seus possíveis modos de falha e monitoramento. Por fim, será apresentada uma revisão das metodologias de níveis de controle.

3.1 BARRAGENS DE MINERAÇÃO

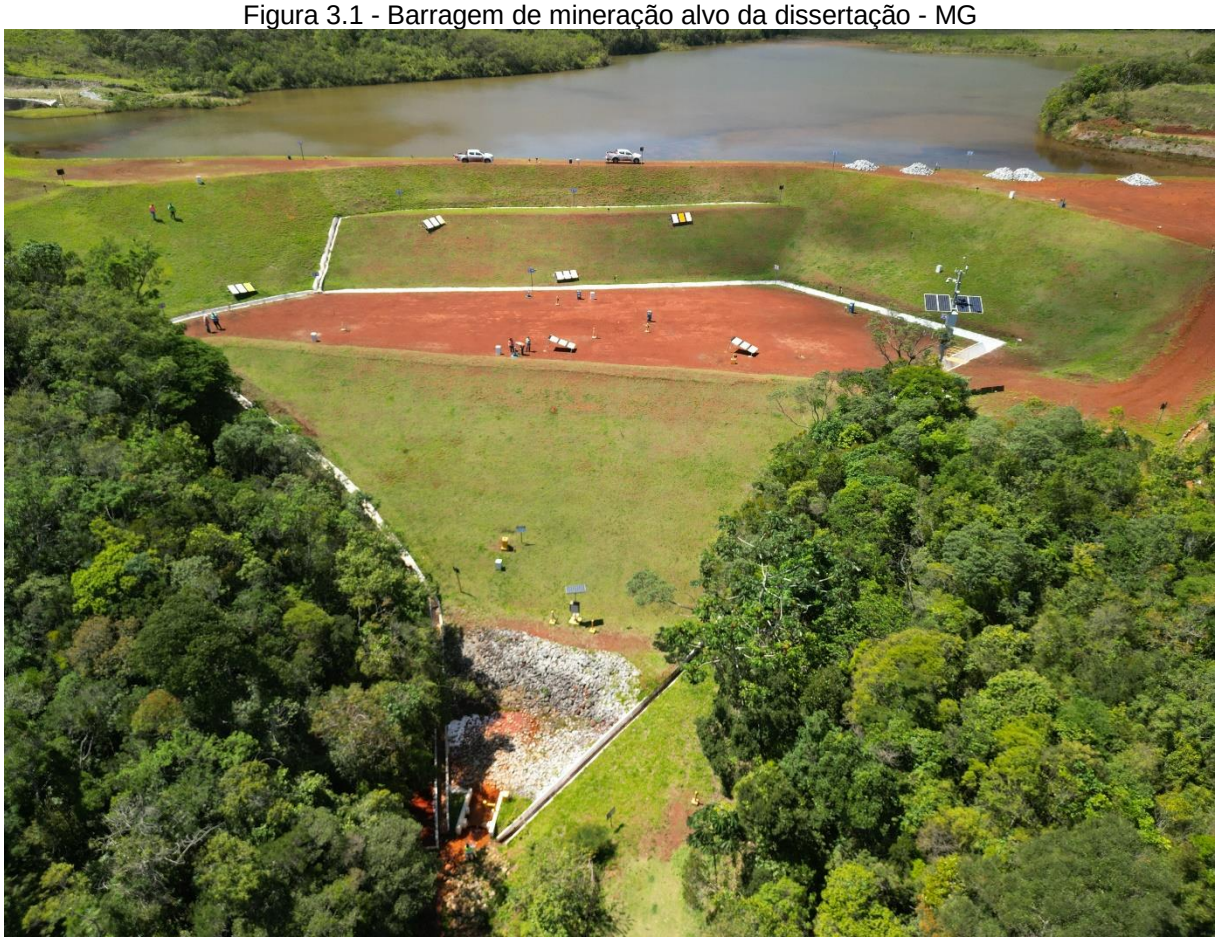
O setor de mineração demanda diversas estruturas e máquinas para seu processo produtivo, com destaque para aquelas voltadas à gestão de resíduos, subprodutos inevitáveis da exploração de minérios. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA (2012), existem dois principais tipos de resíduos sólidos provenientes dessa atividade: os estéreis e os rejeitos.

Conforme IPEA (2012), os estéreis correspondem aos materiais escavados sem valor comercial gerados pelas atividades de extração (ou lavra) da mina. Esses materiais são geralmente dispostos em pilhas, podendo também ser reutilizados para auxiliar na extração do minério. Essas pilhas de estéril, por meio da ação do vento e chuva, produzem sedimentos que precisam ser contidos para evitar assoreamento de cursos d'água. Já os rejeitos são resultado do processo de beneficiamento do minério, podendo conter substâncias tóxicas ou ser quimicamente inertes.

A destinação adequada dos sedimentos e rejeitos, é de extrema relevância para a sociedade e os órgãos reguladores. Uma destinação negligente pode resultar em altos riscos ambientais e sociais, incluindo ameaças à vida humana. Ao mesmo tempo, por não possuírem valor comercial, esses materiais devem ser descartados ou armazenados de forma economicamente viável. Nesse contexto a barragem de rejeito ou sedimento, denominada de forma mais abrangente como barragem de mineração faz parte de um conjunto de estruturas de engenharia responsáveis pela disposição e gerenciamento de rejeitos sólidos ou sedimentos, incluindo sistemas de distribuição de rejeitos e de recuperação de água (IBRAM,2019).

A Figura 3.1 apresenta a barragem estudada nesta dissertação, um exemplo de barragem de mineração com a finalidade de reter sedimentos provenientes de pilhas de estéril.

Figura 3.1 - Barragem de mineração alvo da dissertação - MG



Fonte: Autor (2025)

De acordo com ÁVILA (2012 as barragens de mineração são utilizadas no Brasil desde 1930. No entanto, seu padrão construtivo e as especificações normativas são mais recentes, geralmente impulsionados por acidentes envolvendo essas estruturas. A Tabela 3.1 apresenta os principais acidentes de barragens de mineração no brasil, com perdas de vidas humanas e severos impactos ambientais e econômicos. Dentre esses acidentes, destacam-se os acidentes mais recentes da Barragem de Fundão em Mariana no ano de 2015 e da mina Córrego do Feijão em Brumadinho no ano de 2019, ambos em Minas Gerais.

Tabela 3.1 - Acidentes com barragens de mineração no Brasil nos últimos 40 anos.

ANO	BARRAGEM	MUNICIPIO (UF)	DANOS
1986	Fernandinho	Itabirito (MG)	7 mortes.
2001	Rio Verde	Nova Lima (MG)	5 mortes.
2003	Florestal Cataguases	Cataguases (MG)	Vazamento de lixívia negra, contaminação da água a jusante.
2006/2007	São Francisco	Miraí (MG)	Vazamento de rejeito de bauxita, contaminação da água a jusante.

ANO	BARRAGEM	MUNICIPIO (UF)	DANOS
2014	Herculano	Itabirito (MG)	3 mortes.
2015	Fundão	Mariana (MG)	19 mortes, contaminação da água a jusante.
2019	Córrego do Feijão	Brumadinho (MG)	270 mortes, contaminação ambiental a jusante.

Ao mesmo tempo que esses acidentes provocavam tragédias graves, elas também passaram a catalisar o advento de legislações mais rigorosas e desenvolvimento de novas tecnologias na engenharia de barragens (ÁVILA ,2021). Bradlow et al (2002) sugerem que há uma relação direta entre acidentes com barragens, pressão da sociedade, exigências legais e avanço tecnológico.

Nos anos 2000, as rupturas das barragens da Mineração Rio Verde, em Macacos, e da indústria de papel de Cataguases, em Minas Gerais, motivaram a criação de uma nova legislação estadual sobre a disposição de rejeitos (Deliberação Normativa Conselho Estadual de Política Ambiental nº 62) e o desenvolvimento de um programa pioneiro de gestão de barragens. Nacionalmente, em 2010, a Lei nº 12.334 instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens, abrangendo as barragens de rejeitos e criando o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Em 2020, a Lei nº 14.066 alterou a Lei nº 12.334, com o objetivo de aprimorar a segurança, incluindo a proibição de barragens alteadas por montante.

A Lei nº 14.066/2020 também designou a Agência Nacional de Mineração (ANM) como responsável pela regulamentação e fiscalização das barragens de mineração no Brasil. Em fevereiro de 2022, a ANM aprovou a Resolução nº 95, com alterações publicadas em fevereiro de 2023 na Resolução nº 130, que consolidaram os normativos sobre segurança de barragens de mineração, definindo a estrutura dessas barragens de duas formas:

> Barragens de Mineração:
> a) barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais; e
> b) estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação;

3.1.1 **Métodos construtivos**

Devido às características específicas do material acumulado por barragens de mineração, Soares (2010) afirma que a construção dessas estruturas se tornou uma especialização distinta dentro da área de projetos de barragens convencionais. Nesse contexto, a construção de barragens de mineração segue os princípios básicos das barragens convencionais, mas com peculiaridades quanto ao seu método construtivo.

Barragens convencionais de solo compactado são construídas em uma única etapa. Já nas barragens de mineração, o processo de alteamento se torna viável pela longa duração da atividade mineradora, o que permite maior disponibilidade de recursos e torna esse método economicamente atraente. Além disso, o alteamento contínuo oferece flexibilidade no volume de armazenamento, ajustando-se à demanda do mercado. (SOARES, 2010)

No entanto, apesar da atratividade econômica, o alteamento exige equipes especializadas dentro da mineradora para os projetos de alteamento e uma forte integração entre a equipe de mineradora e os projetistas, além de um rigoroso controle de qualidade dos materiais usados na construção, bem como a necessidade de um plano de monitoramento e controle durante e após o fechamento da barragem de mineração. Contudo, de acordo com Ávila (2012), historicamente as construções de barragens de mineração não apresentavam essas boas práticas de engenharia.

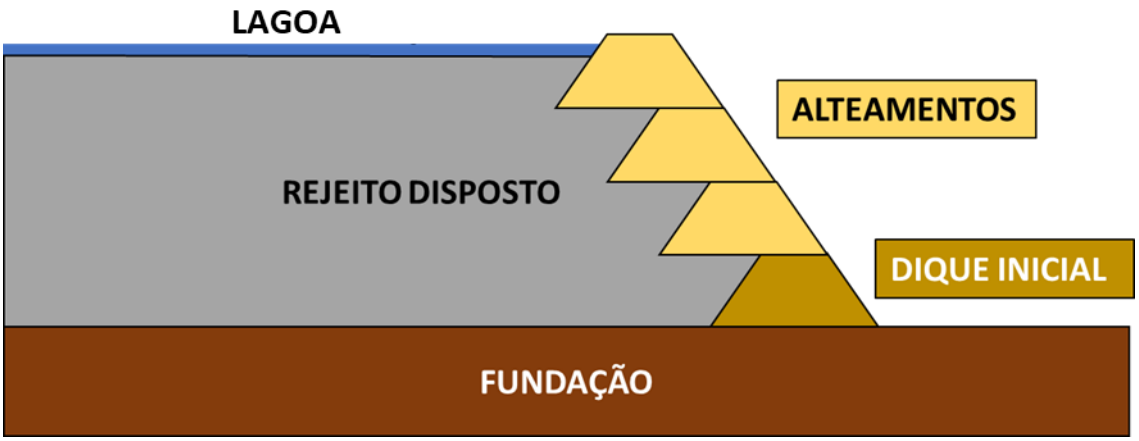
Basicamente, a construção de barragens de mineração por alteamento começa com um dique piloto, chamado dique inicial ou dique de partida. O alteamento subsequente pode ocorrer por três métodos, de acordo com o deslocamento do eixo inicial da barragem: montante, são eles: montante, jusante e linha de centro.

3.1.1.1 Método a Montante

No método a montante, o eixo da barragem é deslocado para montante. O rejeito acumulado a montante do dique inicial forma uma praia de sedimentação, que por sua vez serve de fundação, parcial ou completamente, para construção de outro dique, como mostrado na Figura 3.2. Para que isso ocorra é necessário que o rejeito usado como fundação tenha 40% a 60% de areia e baixa densidade de polpa (SOARES, 2010). Esse método foi amplamente utilizado no Brasil devido ao baixo

custo e maior velocidade construtiva, já que o volume necessário para cada etapa é menor que no método jusante.

Figura 3.2 - Método de Alteamento por Montante



Fonte: Autor (2025)

Contudo, a barragem alteada por montante apresenta algumas características que requererem cuidados e atenção do gestor da estrutura. Primeiramente, devido a linha freática passar próxima ao talude de jusante possibilitando surgência de água no pé ou até em sua superfície, que por sua vez pode causar carreamento de matérias. Além disso, a superfície de ruptura da estrutura, em geral, passa pelos rejeitos sedimentados (não compactados, normalmente) diminuindo seu fator de segurança e aumento as incertezas das características de resistência da estrutura. Outro aspecto de atenção, é a liquefação da massa de rejeitos causada por efeitos sísmicos naturais ou vibrações antrópicas.

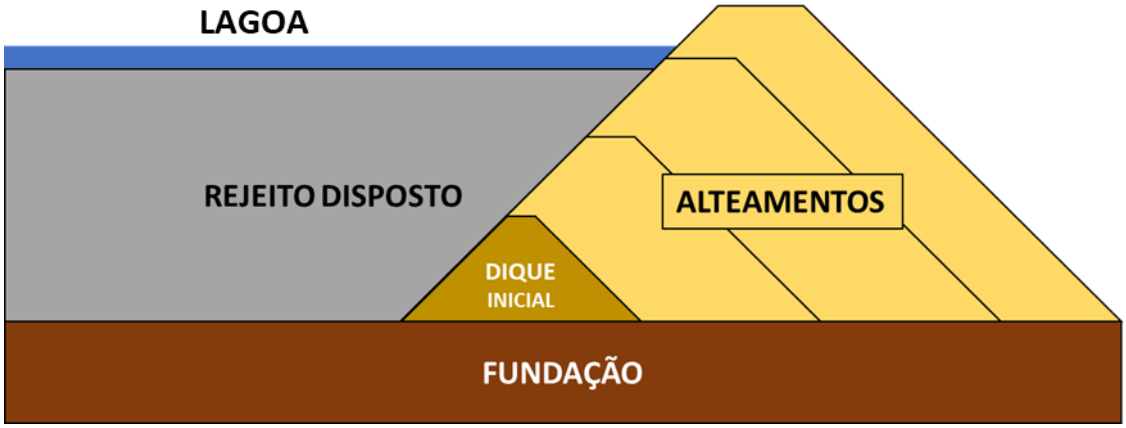
Segundo Ledesma et all (2022), as barragens de rejeitos alteadas a montante são vulneráveis à liquefação, devido ao método de deposição de rejeitos. Os autores listam as ocorrências do fenômeno em nível mundial, foram eles: Rompimento de Merriespruit (África do Sul) em 1994, Fundão (Brasil) em Cadia Valley (Austrália) em 2018 e Brumadinho (Brasil) em 2019.

Em 2020, a Lei Nº 14.066 proibiu a construção ou alteamento de barragens pelo método montante no Brasil, estabelecendo prazos para a descaracterização das existentes. A mesma lei define uma barragem descaracterizada como aquela que não opera como estrutura de contenção de sedimentos ou rejeitos, não possuindo características de barragem.

3.1.1.2 Método a Jusante

No método a jusante, o eixo da barragem é deslocado para jusante à medida que o alteamento ocorre, exemplificado pela Figura 3.3. Semelhante ao método a montante, nessa alternativa faz-se necessário um dique inicial com baixa permeabilidade, normalmente de materiais argilosos compactados. O dique preferencialmente já vem sendo adotado com um princípio de filtro e tapete drenante que será prolongado durante o processo de alteamento. Nota-se, contudo, que é comum o maciço inicial não vir provido de filtro e tapete e eles serem implantados em etapas posteriores de alteamento.

Figura 3.3 - Método de Alteamento a Jusante



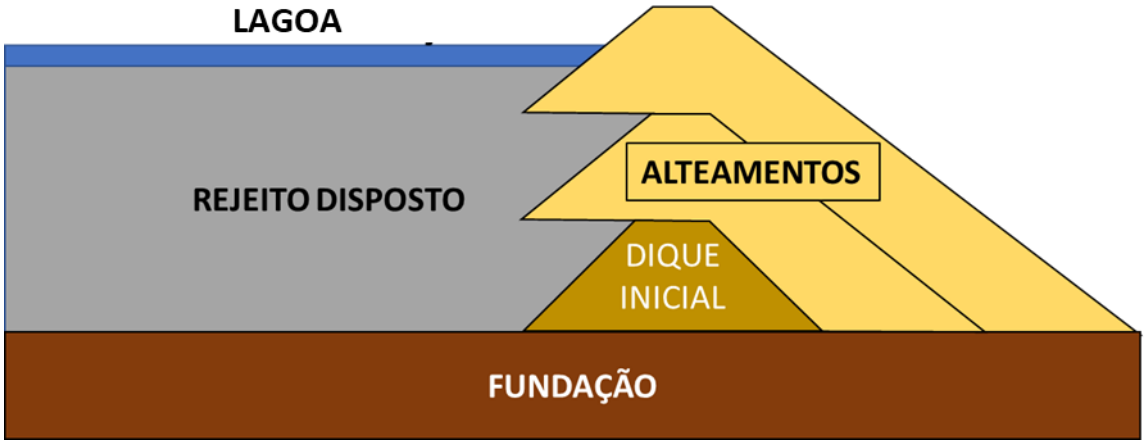
Fonte: Autor (2025)

Esse método tem como vantagens proporcionar para a estrutura uma maior segurança no alteamento, menor possibilidade ruptura horizontais, maior resistência à vibração e possibilidade da instalação de sistema de drenagem durante o alteamento. No entanto, apresenta maior custo devido ao uso de mais material e maior movimentação de terra, além de ser construtivamente mais lento que o método montante

3.1.1.3 Método de Linha de Centro

O método de linha de centro mantém o eixo da barragem na posição original, com o alteamento sendo feito ao longo dessa linha, conforme ilustrado na Figura 3.4. Esse método de alteamento apresenta características intermediárias em relação ao custo e estabilidade, quando comparado aos dois métodos anteriores.

Figura 3.4 - Método de alteamento de linha do centro



Fonte: Autor (2025)

3.1.1.4 Comparação entre os métodos construtivos

A Tabela 3.2 e a Tabela 3.3, resumem as vantagens, desvantagens e principais características de cada método. Segundo VICK (1990), conforme mostrado na Figura 3.5, as barragens alteadas por jusante exigem três vezes mais volume de solo que as alteadas por montante, o que explica a preferência histórica por este último método.

Tabela 3.2 - Resumo das vantagens e desvantagens dos métodos construtivos de barragens de rejeito

Método Construtivo	Vantagens	Desvantagens
Método de Montante	Menor custo e maior velocidade de alteamento.	Maior probabilidade de instabilidade em virtude da existência de finos não adensados próximo ao corpo da barragem. Baixa compacidade do material. Possibilidade de liquefação.
Método de Jusante	Maior segurança. Compactação de todo o corpo da barragem.	Necessidade de grandes quantidades de material de construção (problemas nas primeiras etapas). Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).
Método de Linha de Centro	Variação do volume de material em relação ao método a jusante.	Pode ser necessário estender os trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.

Fonte: Adaptado de Soares (2010)

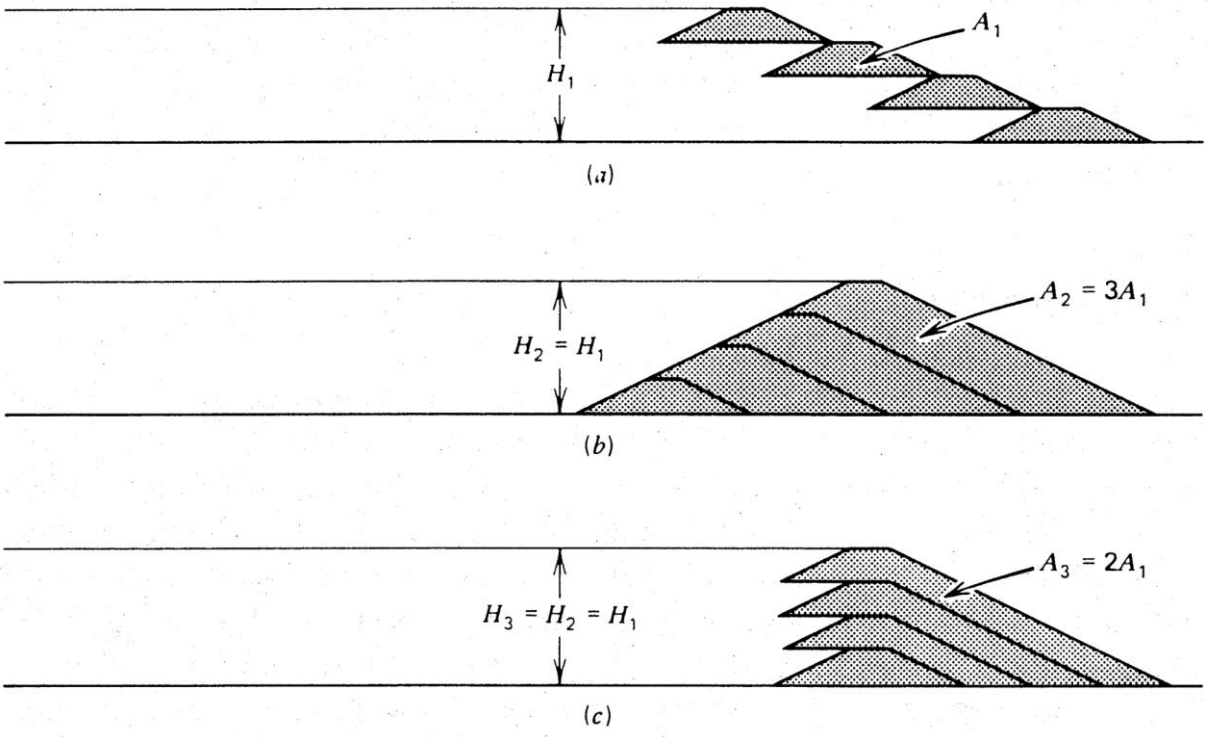
Tabela 3.3 - Comparação entre as principais características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos.

Características	Tipos de Barragem			
	Convencional (Solo compactado)	**Montante**	**Jusante**	**Linha de Centro**
Tipo de Rejeito Recomendado (1)	Qualquer tipo	Mais de 40% de areia. Baixa densidade de polpa para promover segregação.	Qualquer tipo	Areias ou lamas de baixa plasticidade
Armazenamento d´Água	Boa	Não recomendado para grandes volumes.	Boa	Não recomendado para armazenamento permanente.
Resistência Sísmica	Boa	Pobre em áreas de alta sismicidade	Boa	Aceitável.
Restrições de Alteamento	De uma só vez, ou em poucas etapas	Recomendável menos de 5 a 10m/ano	Nenhuma	Pouca
Requisitos de Alteamento	Materiais naturais e/ou estéril.	Solo natural. Rejeitos ou estéril.	Rejeitos ou estéril.	Rejeitos ou estéril.
Custo Relativo do Corpo do Aterro.	Alto ($3V_m$)	Baixo (V_m*)	Alto ($3\ V_m$)	Moderado ($2\ V_m$)

(1) Caraterísticas recomendadas dos rejeitos contidos pelo barramento a depender do seu método de alteamento.
*V_m = volume da barragem pelo método de montante. Fonte: Vick (1990).

Fonte: Soares (2010)

Figura 3.5 - Comparativo volumétrico da barragem de mineração conforme método construtivo: (a) Montante, (b) Jusante e (c) Linha de centro.

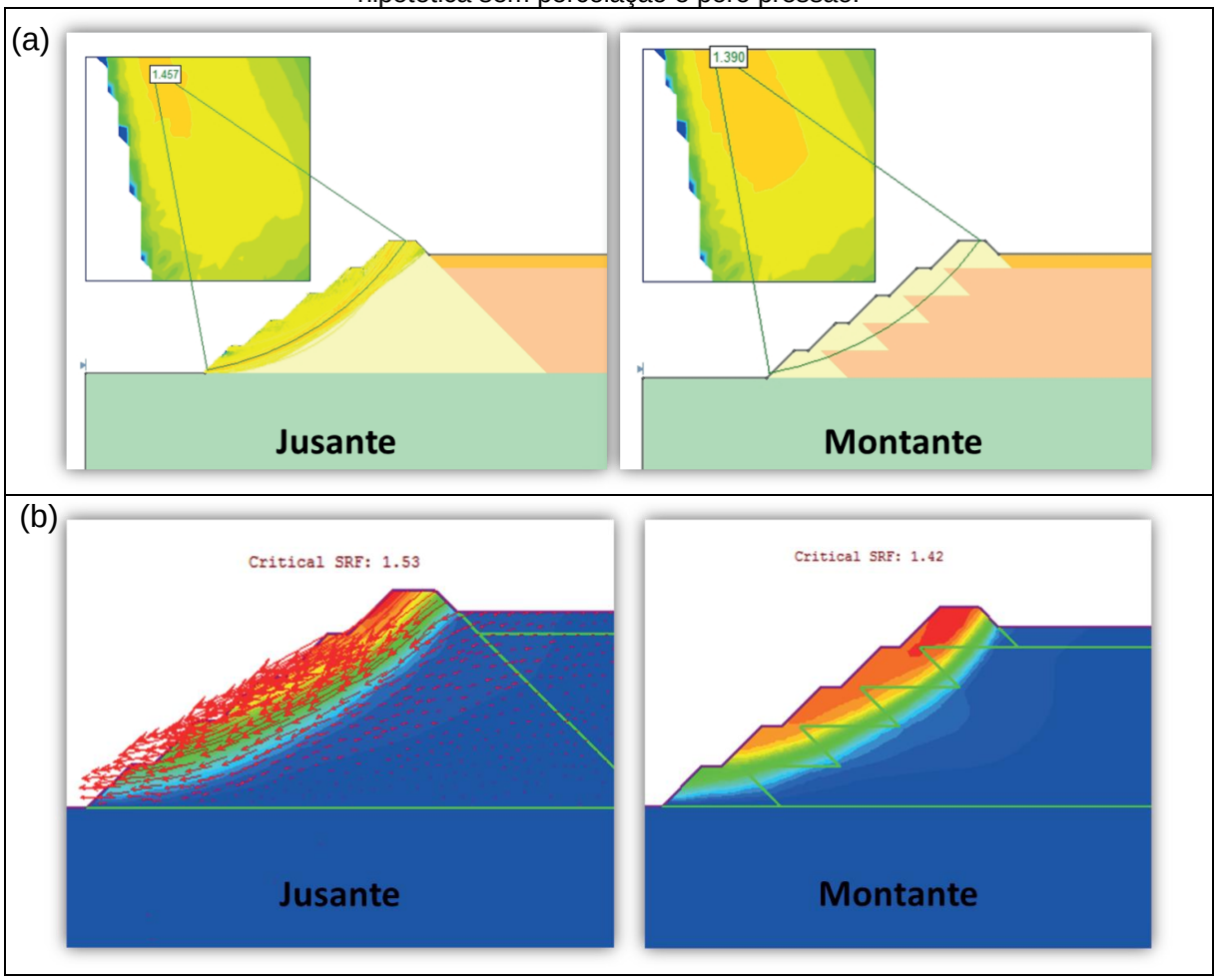


Fonte: Vick (1990)

Cardozo (2024) analisou, por meio de modelos computacionais bidimensionais, o desempenho de segurança de barragens de alteamento montante e jusante. Para a análise, foram utilizados os softwares RS2 e Slide2, ambos da Rocscience. O RS2 aplicou o Método dos Elementos Finitos (MEF) para avaliar a estabilidade, enquanto o Slide2 utilizou o método de equilíbrio limite (método analítico).

A Figura 3.6 apresenta a análise dos modelos computacionais sem percolação e poropressão, com intuito de analisar o comportamento da estrutura sem a influência do fator de drenagem. Os valores de fator de segurança obtidos nessa condição apresentaram uma variação de 5% e 8% por Equilíbrio Limite e por Método dos Elementos Finitos, respectivamente, ambos sendo a condição de construção jusante apresentando maior fator de segurança. A Tabela 3.4 apresenta o resumo dos resultados obtidos pelo autor mencionado.

Figura 3.6 - a) Análise por equilíbrio limite das duas metodologias construtivas, situação hipotética sem percolação e poro pressão b) Análise numérica das duas metodologias construtivas, situação hipotética sem percolação e poro pressão.



Fonte: Cardozo (2024)

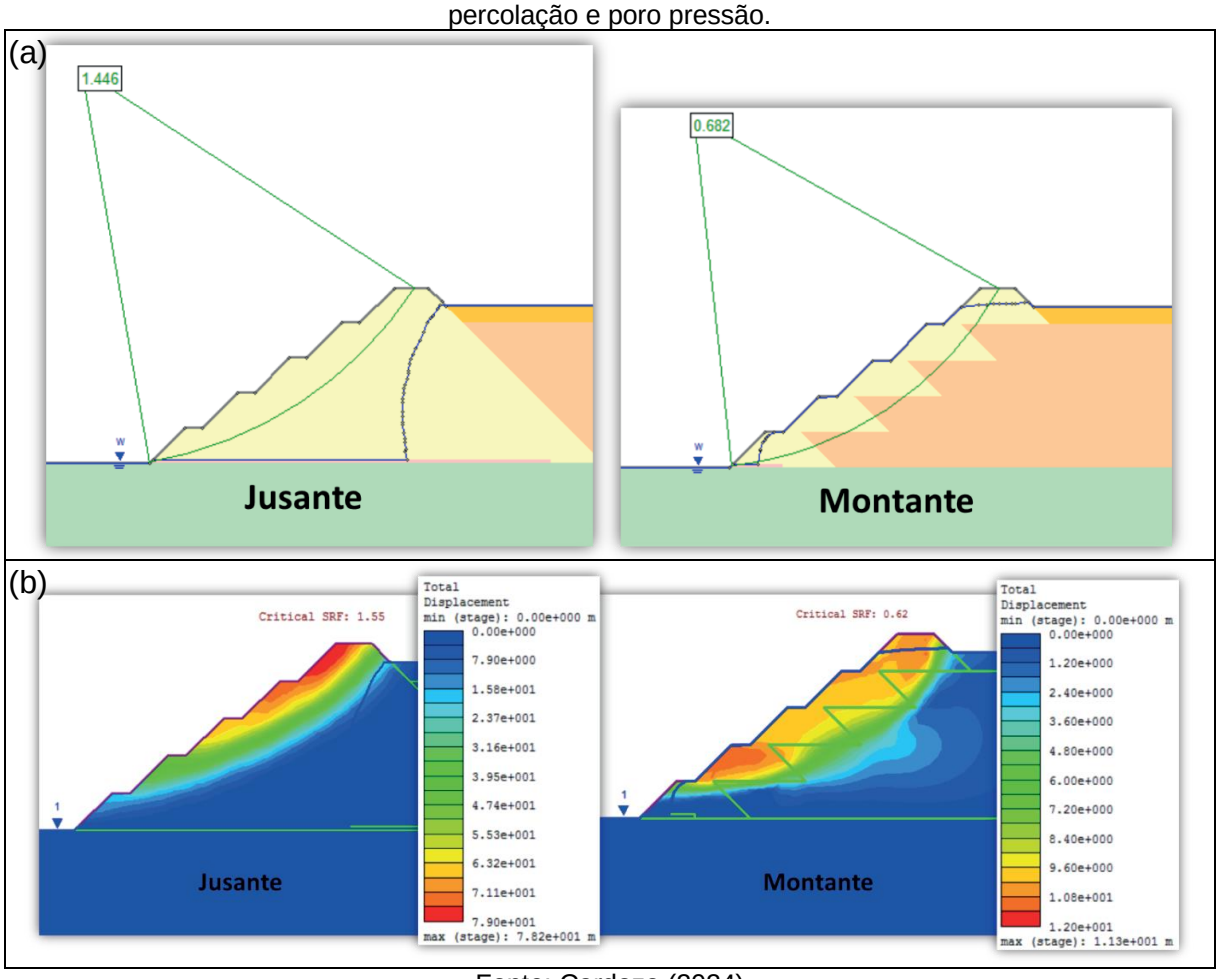
Tabela 3.4 - Resumo dos resultados da avaliação dos dois métodos construtivos, considerando hipótese sem percolação e poro pressão.

Fator de Segurança	Método Construtivo		Diferença Geral
	À jusante	À montante	
RS2	1,53	1,42	8%
Slide2	1,46	1,39	5%

Fonte: Cardozo (2024)

Na segunda etapa dos resultados de Cardozo (2024) foi investigado o comportamento dos barramentos frente à presença de fluido e percolação, Figura 3.7 e Tabela 3.5. Nesse caso, constatou-se uma diferença significativa entre os fatores de segurança dos métodos construtivos. Para o método montante, os fatores de segurança foram inferiores à metade do valor obtido para o método jusante, ficando abaixo de 1, indicando instabilidade.

Figura 3.7 - a) Análise por equilíbrio limite com percolação e poro pressão. b) Análise numérica com percolação e poro pressão.



Fonte: Cardozo (2024)

Tabela 3.5 - Resumo dos resultados da avaliação dos dois métodos construtivos, considerando hipótese com percolação e poro pressão.

Fator de Segurança	Método Construtivo		Diferença Geral
	À jusante	À montante	
RS2	1,55	0,62	150%

Fator de Segurança	Método Construtivo		Diferença Geral
	À jusante	À montante	
Slide2	1,45	0,68	112%

Fonte: Cardozo (2024)

Com base nos resultados apresentados e nas características dos métodos construtivos discutidos, pode-se inferir que ambos os métodos proporcionam desempenhos semelhantes, desde que haja um sistema de drenagem eficiente. Além disso, o método de alteamento a montante demonstra uma vantagem significativa em termos de economia de movimentação de terra, quando comparado ao método de alteamento a jusante, o que pode resultar em benefícios operacionais e econômicos substanciais. Contudo, a sensibilidade quanto a segurança das barragens alteadas por montante, associada ao histórico de falhas desse método construtivo, constitui um dos principais fatores que levaram à sua proibição por lei no Brasil, assim como no Chile e no Peru.

3.2 FLUXO DE ÁGUA EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO

O controle de fluxo em barragens é essencial para a garantia de sua segurança. De acordo com Cruz (2004), a principal causa de ruptura de barragens convencionais é a ausência de um sistema eficiente de controle de fluxo. De forma semelhante, nas barragens de mineração, compreender o comportamento da água ao longo da estrutura é crucial para uma gestão segura. Nesse contexto, é fundamental entender os conceitos de permeabilidade e de redes de fluxo.

3.2.1 **Lei de Darcy**

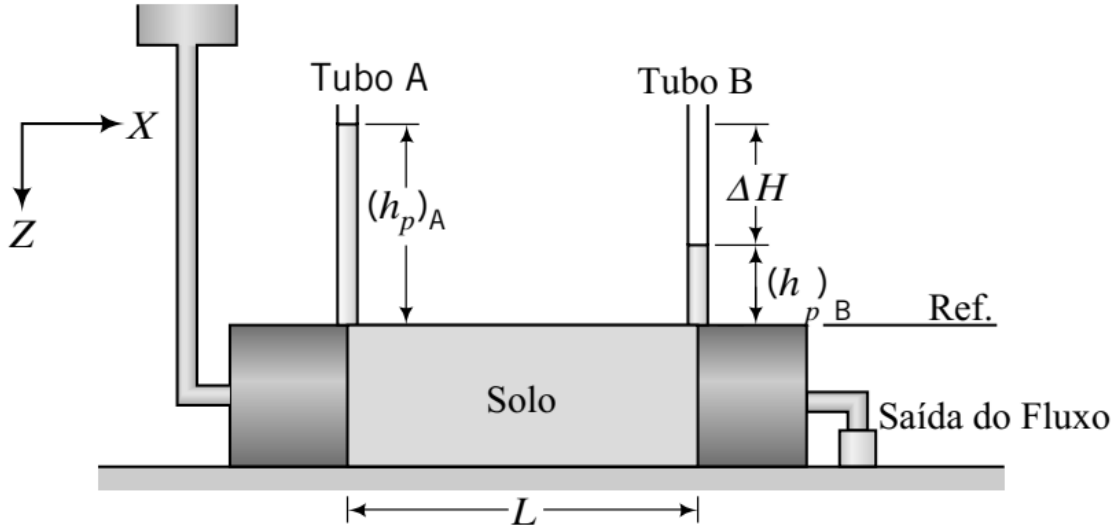
O fluxo de água em meio poroso, solo, acontece do ponto de maior energia para o ponto de menor energia, ocasionado uma perda de carga. A aplicação da equação de Bernoulli para expressar a carga total de um ponto de água em movimento é apresentada na equação (1), observa-se que a equação em questão não apresenta a carga cinética correspondente pois a velocidade de percolação da água nos poros muito baixa e considerada nula.

$$H = h_z + h_p = h_z + \frac{u}{y_w} \quad (1)$$

Em que: H é a carga total, h_z é a carga geométrica, h_p é a carga piezométrica, u é a pressão e y_w é o peso específico da água

A partir da diferença de carga total em dois pontos do fluxo de água é possível calcular a perda de carga, Δh, apresentada na Figura 3.8. Dividindo essa perda de carga pela distância equivalente entres os pontos de carga analisados, é possível expressar a perda de carga de forma adimensional. A perda de carga unidimensional é denominada gradiente hidráulico e pode ser expressa conforme equação (2).

Figura 3.8 - Perda de carga devido ao fluxo de água através do solo

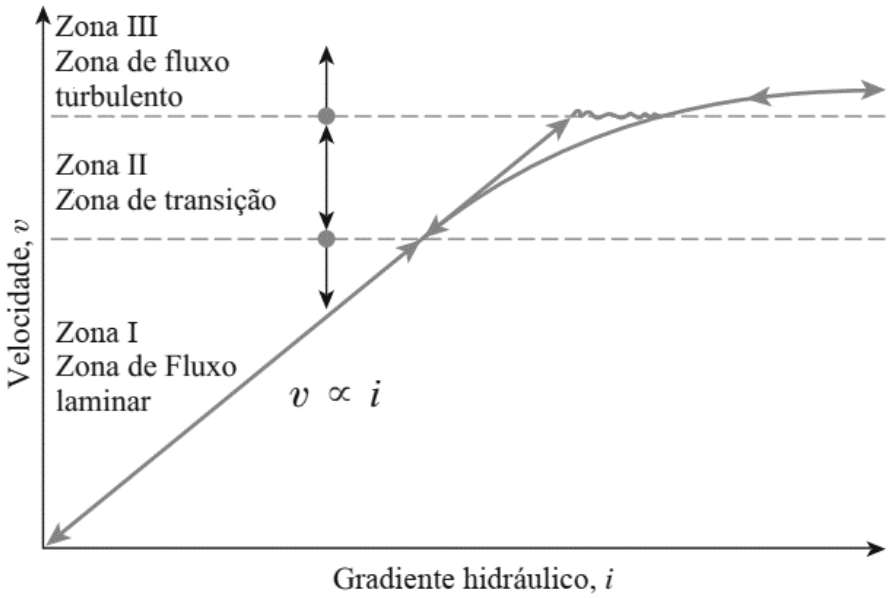


Fonte: Adaptado de Budhu (2010)

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{(h_p)_A - (h_p)_B}{L} \quad (2)$$

Para o caso do fluxo laminar, o gradiente hidráulico apresenta uma relação linear em relação a velocidade de percolação da água, como apresentado na Figura 3.9. A relação entre a velocidade e o gradiente hidráulico em regime laminar é denominado de condutividade hidráulica, conforme Lei de Darcy publicada em 1987. Nessa Lei Darcy relacionou velocidade de percolação com gradiente hidráulico por meio de um coeficiente denominado de condutividade hidráulica, k, como mostrado na equação (3).

Figura 3.9 - Natureza de variação da velocidade com o gradiente hidráulico



Fonte: Adaptado de Das (2018)

$$v = ki \tag{3}$$

A equação fruto da Lei de Darcy, tem como base especialmente as observações do pesquisador a respeito do fluxo de água pelas areias limpas. Posteriormente a publicação da formulação, vários estudos foram realizados para investigar a faixa na qual a lei de Darcy é válida, os quais são resumidos no trabalho de Muskat (1946) e discutido por Mitchell (2005). Segundo (DAS, 2019), levando diversos pontos em consideração é possível concluir que a lei de Darcy é válida.

Conforme Bicalho (2023), originalmente a equação (3) foi definida para condições de fluxo permanente unidimensional em meios homogêneos e isotrópicos e posteriormente foi estendida para condições de fluxo transiente, tridimensional em meios anisotrópicos saturados. A equação estendida pode ser descrita conforme equação:

$$\boldsymbol{v} = -\boldsymbol{K} \cdot \nabla \boldsymbol{h} \tag{4}$$

Onde:

$$v_x = -\left[k_{xx}\frac{\partial h}{\partial x} + k_{xy}\frac{\partial h}{\partial y} + k_{xz}\frac{\partial h}{\partial z}\right] \tag{5}$$

$$v_y = -\left[k_{yx}\frac{\partial h}{\partial x} + k_{yy}\frac{\partial h}{\partial y} + k_{yz}\frac{\partial h}{\partial z}\right] \tag{6}$$

$$v_z = -\left[k_{zx}\frac{\partial h}{\partial x} + k_{zy}\frac{\partial h}{\partial y} + k_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right] \tag{7}$$

Na equação (4), $\boldsymbol{v}$ representa a velocidade de descarga (vazão por unidade de área) nas direções x, y e z; $\boldsymbol{K}$ o tensor de condutividade hidráulica e $\nabla \boldsymbol{h}$ o gradiente hidráulico. Bicalho (2023) destaca que, em meio anisotrópico a inexistência de gradiente em uma determinada direção não significa que o fluxo seja nulo nessa mesma direção. Ou seja, o gradiente por si só, não definem a direção do fluxo e, nesse caso, as linhas de fluxo não são perpendiculares às linhas equipotenciais.

Buckingham (1907), generalizou a equação de Darcy para solos não saturados introduzindo uma relação funcional entre condutividade hidráulica e o conteúdo de água no solo e uma relação entre o potencial mátrico e o conteúdo de água no solo. Denomina como Equação de Buckingham-Darcy.

3.2.2 **Fluxo de água em meio poroso**

Em casos práticos de engenharia, o conhecimento do caminho do fluxo é essencial. Nesses casos, a natureza do fluxo de água através do solo faz com que a velocidade e o gradiente variem ao longo do meio. O cálculo do fluxo para esses problemas é geralmente efetuado por meio de recursos gráficos denominados de rede de fluxo.

O conceito da rede de fluxo é baseado na equação de continuidade de Laplace, que descreve a condição de fluxo constante para um determinado ponto de massa de solo saturado. A equação (8) apresenta a equação diferencial de continuidade para fluxo tridimensional, chamada de equação de Laplace.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad (8)$$

Em que: k_x, k_y, k_z são os coeficientes de permeabilidades nas direções x, y e z, respectivamente e h é a carga hidráulica no ponto analisado

A equação de Laplace apresentada possui de alguns pressupostos, são eles:

- Validade da lei de Darcy para fluxo analisado
- Fluxo sem vórtices.
- Tensões cisalhantes desprezadas
- Solo é homogêneo e saturado
- Solo e água incompressíveis, sem mudança de volume

Contudo, na natureza o fluxo de água acontece tanto em meios saturados como em meios não saturados. Para o caso de uma análise de infiltração transitória 3D, a equação de Richard é adotada para descrever o fluxo de água em solo não saturado com base na lei de Darcy e na conservação de massa, conforme

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} - q = -\frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (9)$$

Em que:
k_x, k_y, k_z são os coeficientes de permeabilidades em condição não saturada nas direções x, y e z, respectivamente;
h é a carga hidráulica no ponto analisado;
q indica o fluxo limite aplicado;
θ_w é o teor volumétrico de água;
t significa tempo decorrido.

Para compreender o comportamento do fluxo em meios não saturados, são necessários conceitos como a curva de retenção de água no solo e a função de permeabilidade, conforme propostos por Genuchten (1980) e expressos nas equações (10) e (11). De forma objetiva, curva de retenção é a relação entre o grau de saturação e sucção matricial em relação a água no solo, enquanto a função de permeabilidade é a relação entre permeabilidade e sucção matricial

$$S_e = \frac{S - S_R}{1 - S_r} = \left(1 + \left(\alpha(u_a - u_w)\right)^n\right)^{-m} \quad (10)$$

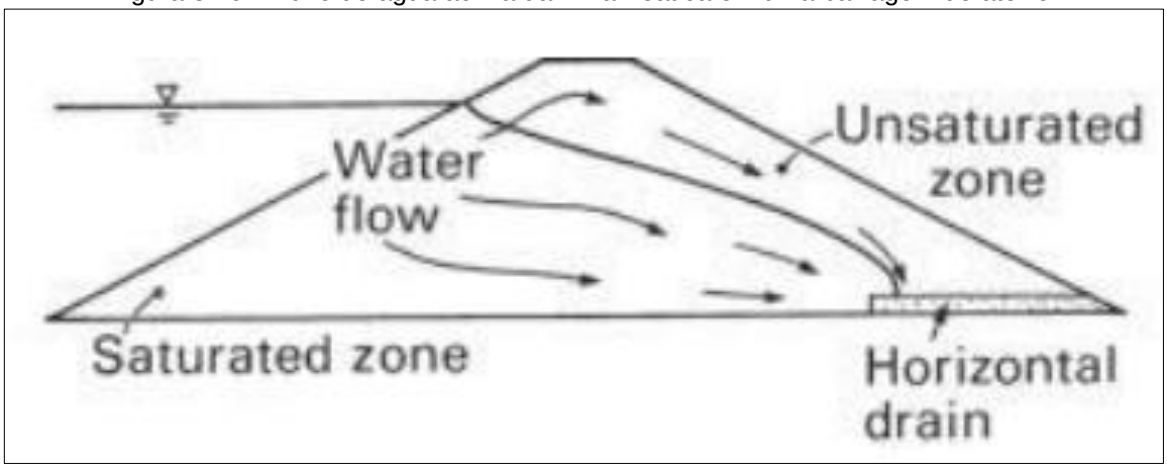
$$k = k_s S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (11)$$

Em que:
α, m, n são os parâmetros de ajuste da curva de retenção e $m = 1 - 1/n$;
S_e, S_r são os graus de saturação efetivo e residual, respectivamente
u_a, u_w denotam as pressões do ar nos poros e da água nos poros, respectivamente;
$(u_a - u_w)$indica sucção matricial$c$é o teor volumétrico de água;
k_s é a permeabilidade à água saturada

As análises de infiltração historicamente se concentraram no fluxo de água na zona saturada. Contudo, geralmente os processos de infiltração ocorrem na natureza em meios não saturados. A precipitação, por exemplo, ocasiona passagem de água da atmosfera através da zona não saturada do solo para se tornar parte do sistema de águas subterrâneas. No âmbito das barragens, o fluxo de água costumava ser analisada considerando apenas a zona abaixo de uma linha de percolação. Não

obstante, com o conhecimento atual da física do fluxo através da zona de solo não saturada, juntamente com a capacidade computacional disponível atualmente, é possível modelar o fluxo contínuo de água entre as zonas saturadas e insaturadas, como mostrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Fluxo de água acima da linha freática em uma barragem de aterro.



Fonte: Fredlund (2013).

Fredlund (2013) explica que a principal diferença entre os fluxos em solos saturados e não saturados reside no comportamento do coeficiente de permeabilidade. Para solos saturados, esse coeficiente é considerado constante. Porém, em solos não saturados, ele depende de variáveis como sucção, teor de água e outras condições que afetam a permeabilidade. A pressão da água nos poros também varia entre esses dois tipos de solo: nos saturados, a pressão da água é geralmente positiva, enquanto para os não saturados, ela é negativa.

A variação da resistência em zonas não saturadas em função da sucção é pouco explorada no monitoramento de barragens de mineração, apesar de sua relevância para a modelagem do fluxo. Esse aspecto ganha especial importância diante das análises de causas de rompimentos, como no caso de Brumadinho. De acordo com o "*Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I*" (Robertson et al., 2019), embora a posição do nível da água e a infiltração associada na face a jusante da Barragem Feijão I, em Brumadinho (MG), não apresentem alterações significativas ao longo do tempo, a alta precipitação e a consequente infiltração reduzem as sucções na zona não saturada. Nesse caso, a perda de sucção devido à infiltração da chuva foi estimada em cerca de 50 kPa, o que resultou em uma diminuição da resistência ao cisalhamento nesta região entre 10 kPa e 15 kPa, conforme apontado pelos especialistas responsáveis pelo relatório.

3.2.3 **Fatores que Influência o valor de permeabilidade**

A permeabilidade é um parâmetro altamente variável e depende de diversos fatores, os quais são listados a seguir a partir de Das (2019) e Budhu (2010):

- Tipo de solo: Solos com granulometria grossa, em geral, apresentam permeabilidade maiores que solos com granulometria fina;
- Tamanho das partículas: Particularmente para o caso de areia limpas ou solos grossos homogêneos, a condutividade hidráulica depende dos valores de $(D_{50})^2$ ou $(D_{10})^2$;
- Propriedades do fluido permeante, especialmente viscosidade: Quanto maior a viscosidade do fluido, menor será a permeabilidade do solo em relação ao fluido. Além da viscosidade, a densidade e concentração do permeante também são fatores de influência relevante;
- Índice de vazios: $k_1:k_2 \approx e_1:e_2$, ou seja, dado dois solos de estruturas semelhantes com diferentes condições de índices de vazios, denominados condição 1 e 2, a relação entre k_1 e k_2 é aproximadamente igual a relação de e_1 e e_2. Em que **k** é o coeficiente de permeabilidade e **e** é o índice de vazios. Observa-se, contudo, que dois solos com o mesmo índice de vazios podem ter condutividades hidráulicas diferentes, por conta de outros fatores. Cruz (2004) afirma que o índice de vazios, se considerado isoladamente, não pode ser associada uma permeabilidade, porque são as dimensões e as formas dos vazios que definem esse coeficiente. O autor, ainda apresenta resultados de ensaios para o mesmo solo em diferentes condições, em que para o mesmo índice de vazios a permeabilidade pode variar em até 500 vezes.
- Grau de Saturação: Quanto maior o grau de saturação, maior a permeabilidade do solo;
- Tamanho dos poros: Quanto maior o espaço poroso interconectado, maior será a condutividade hidráulica. Destaca-se, entretanto, que poros grandes não indicam alta porosidade. O fluxo de água através dos solos está relacionado ao quadrado do tamanho dos poros, e não ao volume total dos poros;

- Estrutura do solo: Solos de granulometria fina com estrutura floculada apresentam alta permeabilidade em relação a solos com estrutura dispersa;
- Homogeneidade, estratificação e fissuras: A água tende a escoar rapidamente através de camadas soltas, através de fissuras e ao longo da interface dos solos em camadas. Falhas catastróficas podem ocorrer devido a essa infiltração;
- Gases retidos: Os gases aprisionados tendem a reduzir a condutividade hidráulica. Muitas vezes é muito difícil obter solos livres de gases. Mesmo os solos que estão abaixo do nível do lençol freático e que se presume estarem saturados podem ainda ter alguns gases aprisionados.

3.2.4 **Efeitos da compactação na permeabilidade de solos coesivos**

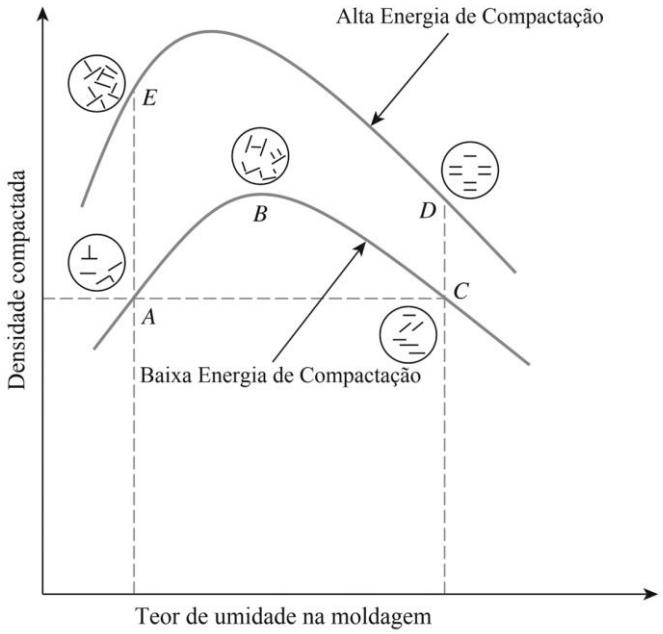
O item anterior apresenta características do solo, que modificadas, facilitam ou dificultam a passagem de fluidos no solo, influenciando o coeficiente de permeabilidade. Essas características, no entanto, podem ser inerentes à condição do solo na natureza ou podem ser geradas por ação antrópica por meio de técnicas de obra geotécnica. Dentre essas técnicas umas das mais relevantes e presentes nas obras de terra é a compactação.

A compactação é uma técnica presente em diversas obras tais como aterro sanitário, aterro rodoviário e barragem. Essa técnica causa variação na estrutura do solo, modificando especialmente seu índice de vazios pela expulsão de ar. Dessa forma, essa técnica influencia a permeabilidade dos solos de modo geral. Contudo, no caso dos solos coesivos, não apenas o ato da compactação influência significativamente a permeabilidade como também o teor de umidade e a energia de compactação utilizados no ensaio ou na obra, pois a depender a desses fatores o solo coesivo pode apresentar uma estrutura mais dispersa ou mais floculada.

A condutividade hidráulica para solos coesivos compactados diminui com o aumento de teor de umidade. Os maiores valores de condutividade hidráulica estão no ramo seco da compactação com alta energia de compactação é devido a orientação aleatória das partículas de argila, estrutura floculada ponto D da Figura

3.11, resultando em espaços vazios maiores. Enquanto isso, a compactação no ramo úmido, resulta em partículas com orientações mais paralelas, estrutura dispersa ponto E da Figura 3.11, menores espaços vazios e maior anisotropia.

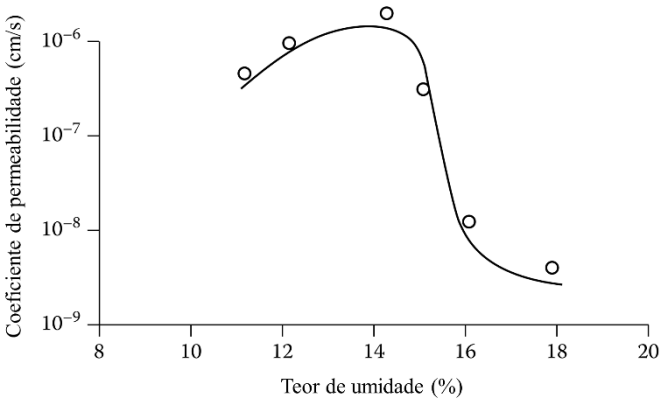
Figura 3.11 - Efeito da compactação na estrutura de solo argiloso



Fonte: Traduzido de Das (2019)

A Figura 3.12 apresenta resultados de ensaios de compactação realizados em laboratório em solo argiloso bem como a variação do coeficiente de permeabilidade da argila nas condições correspondentes. Observa-se que a permeabilidade nesse caso variou em mais de 100 vezes, para o mesmo tipo de solo. Esse conhecimento é aplicado em compactação de diversas obras de terra, tais como camada impermeável de aterros sanitários e núcleo argiloso de barragem.

Figura 3.12 - Efeito da compactação permeabilidade de solo argiloso (a) em relação ao peso especifico (b) em relação a permeabilidade



Fonte: Traduzido de Das (2019)

Além disso, especialmente em barragens, a correta execução da compactação é vital para garantir a segurança na obra no que se refere a retenção da água. Uma vez que, caso as camadas compactadas sucessíveis não apresentem uma boa ligação, o permeante pode mover-se através de uma fenda na argila compactada fluindo ao longo da interface entre duas camadas compactadas até encontrar outra interface, podendo gerar erosão interna da barragem.

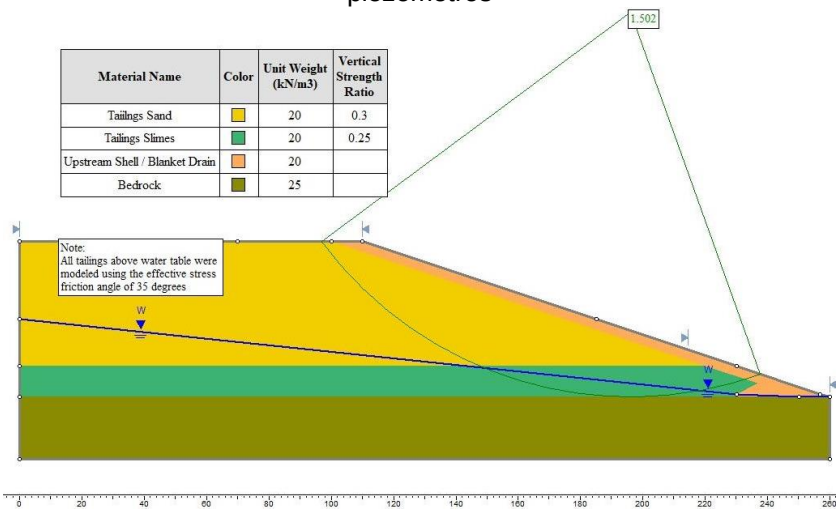
Dessa forma, em caso de calibração de permeabilidade para um modelo computacional, o conhecimento da execução da compactação das camadas de terra da obra é de vital importância para uma maior representatividade do modelo. Além das características dos solos e resultados de ensaios.

3.2.5 **Aplicação do fluxo em barragens de mineração**

A aplicação dos conceitos de fluxo de água em barragens é predominantemente realizada por meio de modelos bidimensionais (2D), sendo modelos tridimensionais (3D) utilizados apenas em casos específicos. Na modelagem 2D, é prática comum na engenharia a adoção de superfícies freáticas derivadas de interpolações lineares, baseadas em dados obtidos por instrumentação piezométrica ou de níveis freáticos.

Contudo, Gjerapic e Znidarcic (2020) alertam que essa abordagem, embora amplamente utilizada devido à sua simplicidade, pode violar princípios fundamentais do fluxo de água. Na Figura 3.13, uma suposição de gradiente hidráulico constante (implícita pela mudança linear nos níveis de água ao longo do caminho do fluxo) é adotada e, consequentemente, a velocidade de infiltração é constante ao longo do caminho do fluxo, assumindo que não há mudanças nas propriedades hidráulicas. Gjerapic e Znidarcic (2020) observaram que, a partir do princípio da conservação de massa, o produto da velocidade e da área da seção transversal deve permanecer constante ao longo do caminho do fluxo. Se a velocidade de infiltração for constante ao longo do caminho do fluxo, nem o gradiente hidráulico nem a condutividade hidráulica mudam. Assim, a área de fluxo continuamente reduzida descrita na Figura 3.13 viola o princípio da conservação de massa e, portanto, é fisicamente impossível.

Figura 3.13 - Cenário de linha de base usando interpolação linear de níveis freáticos entre piezômetros

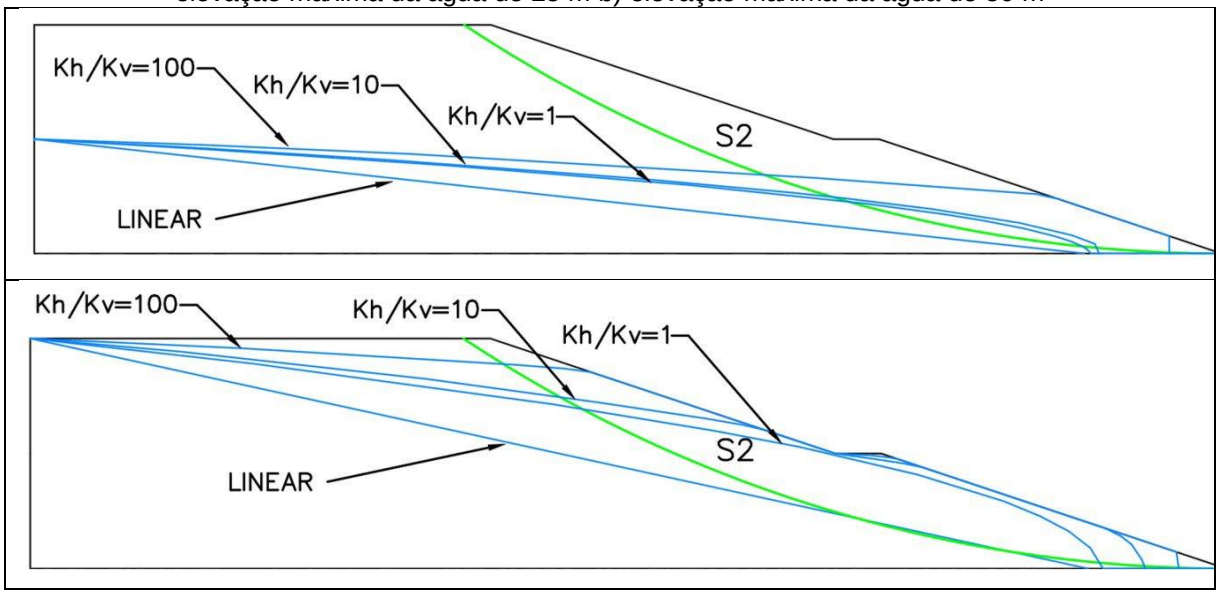


Fonte: Gjerapic e Znidarcic (2020)

Diante disso, os autores recomendam que as pressões de poros sejam definidas no modelo por métodos analíticos ou por análise numérica via método dos elementos finitos (MEF).

A partir desse entendimento, e para demostrar a discrepância entre o resultado do nível freático por interpolação linear e por rede de fluxo, Znidarcic et al (2024), realizaram uma análise crítica de infiltração em relação a estabilidade de barragens de mineração, em que adotam uma superfície interpolada linearmente e superfícies de percolação por MEF para diferentes razões de permeabilidade horizontal e vertical, ou seja, considerando diferentes anisotropias. Além disso, consideram dois cenários, em que um considera o nível freático no meio da camada de rejeito (hmáx=25 m) e o segundo considera o nível freático no topo da cama de rejeito (hmáx=50 m), conforme apresentado na Figura 3.14. Para cada nível freático de cada cenário, os autores calcularam o fator de segurança da superfície pré-definida, a S2. Os resultados mostrados na Tabela 3.6 constatam que a suposição comumente empregada de uma linha piezométrica linear pode subestimar significativamente as pressões de poros nas superfícies de falha potenciais. Quando os resultados de análises de infiltração executadas corretamente são comparados à linha piezométrica linear, o fator de segurança reduz em 25%, 40% ou até 50%. Levando em conta a presença inevitável de anisotropia de rejeitos pode resultar em uma redução adicional no FS para 50% ou até 20% do valor original.

Figura 3.14 - Comparação de linhas freáticas em estado estacionário para K_h/K_v = 1, 10 e 100 e a) elevação máxima da água de 25 m b) elevação máxima da água de 50 m



Fonte: Znidarcic et al (2024)

Tabela 3.6 - Fatores de segurança calculados para vários cenários de infiltração

Descrição do Caso	FS para superfície de ruptura S2
Linha piezoelétrica linear, $h_{máx}$ =25 m	2,51
Linha freática MEF, $h_{máx}$ =25 m, K_h/K_v=1	2,42
Linha freática MEF, $h_{máx}$ =25 m, K_h/K_v =10	2,38
Linha freática MEF, $h_{máx}$ =25 m, K_h/K_v =10	1,97
Linha piezoelétrica linear, $h_{máx}$ =50 m	2,13
Linha freática MEF, $h_{máx}$ =50 m, K_h/K_v =1	1,59
Linha freática MEF, $h_{máx}$ =50 m, K_h/K_v =10	1,32
Linha freática MEF, $h_{máx}$ =50 m, K_h/K_v =100	1,11

Fonte: Adaptado de Znidarcic et al (2024)

3.2.6 **Problemas da gestão de água em barragens de mineração**

A água exerce um importante papel na segurança e risco associados às barragens de mineração. De acordo com Bittar (2017), reduzindo a água, os riscos geotécnicos são reduzidos e quanto maior a quantidade de água, maior o potencial de dano associado. Especificamente no contexto de barragens de mineração, Znidarcic et al (2024) afirmam que a estabilidade de uma barragem de rejeitos pode ser comprometida por infiltração interna mesmo na ausência de quaisquer outros gatilhos externos, como terremoto ou carga estática, infiltração de chuva ou derretimento de neve, aumento de fluxos antecedentes e outros gatilhos naturais ou antrópicos.

Nesse sentido, as causas de falhas em estruturas de mineração podem ser frequentemente atribuídas a mecanismos que envolvem mudanças nas condições de infiltração e saturação. Os documentos sobre as falhas nas instalações de armazenamento de rejeitos de Mariana (Fundão) e Brumandinho (Feijão) corroboram esse entendimento, evidenciando mudanças nos níveis freáticos, condições de saturação e/ou expressões superficiais de infiltração que foram observadas antes dos eventos de falha (Morgenstern et al. 2016, Robertson et al. 2019).

Ao analisar o papel da água no desencadeamento de acidentes em barragens de rejeitos, Bittar (2017) apresentou as informações que estão sintetizadas na Tabela 3.7. Esses e outros problemas serão analisados no item seguinte no qual serão considerados as principais causas de rompimento, modos de falhas, das barragens de mineração.

Tabela 3.7- Falhas de contenção devido a problemas com gestão da água em barragens de rejeito

Falhas de contenção	Problemas com a gestão da água
Galgamento	• Controle do reservatório inadequado - Grande quantidade de água acumulada. • Volume do amortecimento insuficiente. • Ausência de comprimento de praia adequado. • Projeto de vertedouro ou critério hidrológico/hidráulico inadequados. • Obstrução do vertedouro ou falha estrutural. • Falha nas estruturas de desvio. • Controle do balanço hídrico e de massa inadequados. • Falha no acompanhamento do nível de enchimento do reservatório.
Liquefação e Erosão Interna	• Projeto de drenagem (interna e superficial) inadequados. • Presença de material saturado. • Controle do reservatório inadequado • Caminhos preferenciais de percolação com fluxo concentrado. • Ausência de praia adequada. • Aumento das pressões induzidas por uma subida da superfície freática • Sismos naturais acima da magnitude do projeto. • Solos susceptíveis a instabilidade interna. • Fluxo concentrado ao longo e/ou para dentro de condutos enterrados. • Fluxo concentrado no contato com estruturas de concreto.
Instabilização	• Rebaixamento rápido do reservatório. • Baixa resistência do material da fundação e/ou do maciço da barragem • Poropressões elevadas.
Contaminação	• Caminhos preferenciais de percolação com fluxo concentrado (falha do revestimento para barragens revestidas ou erosão interna). • Controle do balanço hídrico e de massa inadequados. • Falha no acompanhamento do nível de enchimento do reservatório. • Vertimento.

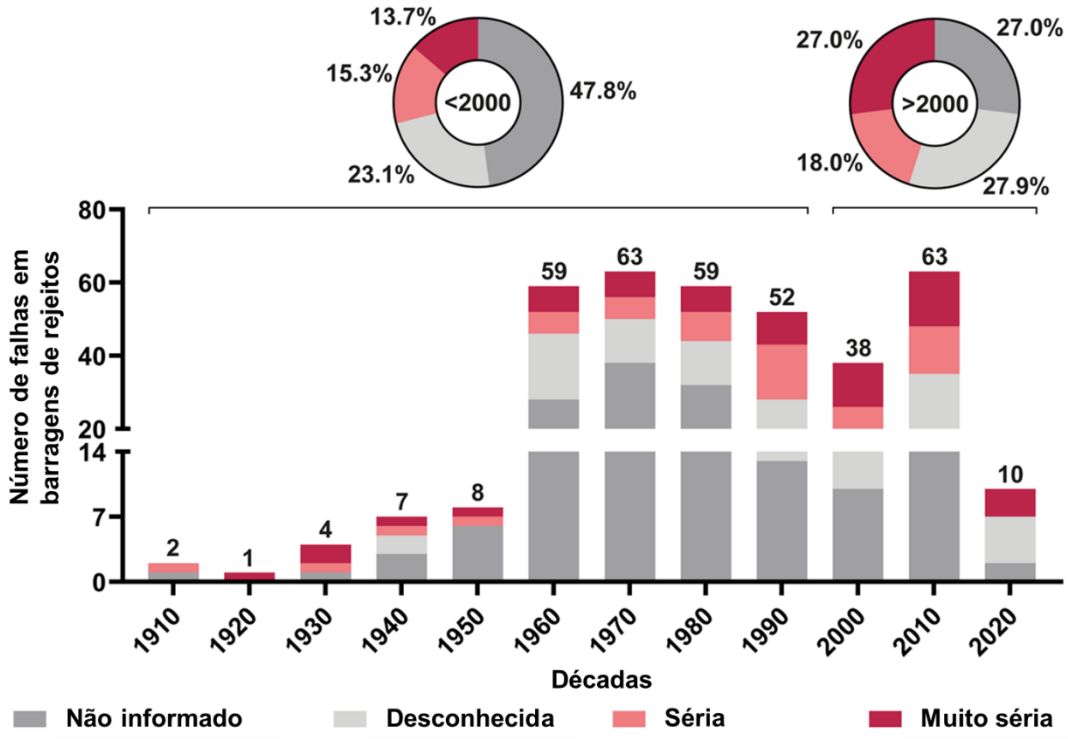
Fonte: Brittar (2017) apud (Mello, 2021)

3.3 MODOS DE FALHA

Historicamente, diversos acidentes graves de ruptura de barragens de mineração têm ocorrido, como nos casos de Los Frailes Aznalcóllar (Espanha, 1998), Ajka Alumina Plant (Kolontár, Hungria, 2010), Mount Polley (Canadá, 2014), Samarco Fundão (Brasil, 2015), Brumadinho Feijão (Brasil, 2019), Jagersfontein (África do Sul, 2022) e Williamson (Tanzânia, 2022). Essas falhas causaram impactos significativos nos âmbitos social, ambiental e econômico, sendo que, em alguns casos, resultaram na morte de pessoas (CACCIUTTOLO, 2023).

A partir de três bancos de dados (ICOLD & UNEP, WISE e CSP2), GARCIA (2024) resume, conforme Figura 3.15, as ocorrências de falhas no período de 1915 a 2021. Embora os números apresentados provavelmente estejam subestimados, devido à existência de acidentes não registrados, é possível observar um aumento no número de falhas a partir de 1960. GARCIA (2024) associada esse aumento ao crescimento da atividade de mineração após a Segunda Guerra Mundial. Além disso, a figura mostra uma mudança na classificação das falhas após 2000, com redução de casos desconhecidos e aumento das falhas classificadas como "sérias" e "muito sérias".

Figura 3.15 - Visão geral histórica e de gravidade das falhas de barragens de rejeitos.



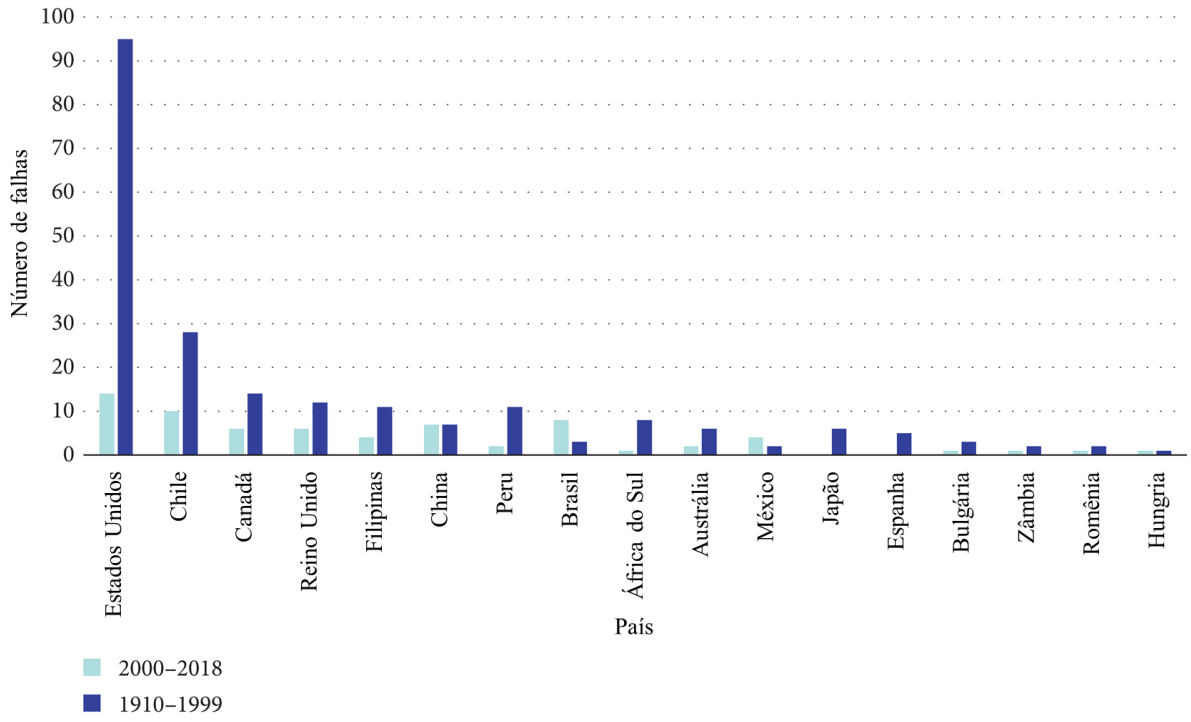
Fonte: GARCIA, 2024

Em relação às características das falhas em barragens de mineração, Piciullo et al. (2022), com base no banco de dados do Centro para Ciência em Participação Pública (*Centre for Science in Public Participation* - CSP2) disponível em novembro de 2021, que abrange um total de 257 casos, apresentam as distribuições percentuais das rupturas em relação a quatro categorias:

- Classificação de Modo de Falha: Galgamento, liquefação estática e liquefação dinâmica são as causas mais frequentes de falha em barragens. No entanto, para 52 dos 257 casos (19%), o modo de falha é desconhecido.
- Metodo Construtivo: O método de construção "a montante" é o tipo de construção de barragem com a maior porcentagem de falha (32%). No entanto, em quase metade das falhas (49%) registradas no banco de dados, o tipo de construção da barragem de rejeitos é desconhecido.
- *Status* de Operação: 82% das falhas ocorreram em barragens de rejeitos em operação, ou seja, aquelas recebendo contribuição da mina em atividade.
- Perdas de vidas humanas: 17% das falhas resultaram em perdas humanas, sendo que 4% delas causaram mais de 50 vítimas.

Considerando a situação socioeconômica dos países onde ocorreram falhas em estruturas de armazenamento de mineração, Lyu et al. (2019) afirma que os eventos de falha em barragens de rejeitos geralmente acontecem em nações em desenvolvimento com rápido crescimento econômico, como Brasil, Chile e China. O estudo destaca que, nos últimos anos, a proporção de falhas tem sido relativamente alta nesses países, enquanto a maioria das rupturas em nações desenvolvidas ocorreu há várias décadas. Essas tendências estão representadas na Figura 3.16, na qual se observa que a quantidade de acidentes no Brasil entre 1910 e 1999 é inferior à quantidade registrada a partir de 2000.

Figura 3.16 - Eventos de falha ao longo do tempo por pais



Fonte: Lyu et al. (2019)

Nos últimos anos, diversos estudos têm sido realizados para entender as causas desses desastres relacionados ao gerenciamento de rejeitos de mineração. CACCIUTTOLO (2024) compila as conclusões de pesquisadores e engenheiros sobre os principais fatores contribuintes para essas falhas, listados a seguir:

(i) Procedimentos inadequados de construção de barragens;

(ii) A instabilidade do método de construção “a montante”;

(iii) Gestão ineficiente das operações de TSF (*Tailings Storage Facilities*, em português: instalações de armazenamento de rejeitos);

(iv) Empresas de engenharia com descontinuidade nos estudos técnicos e mudanças frequentes de empreiteiros de construção.

Além disso, CACCIUTTOLO (2024) destaca que a geração de rejeitos de mineração tem aumentado mundialmente devido à crescente demanda por minerais essenciais para atender à crescente necessidade por energia limpa e tecnologias de baixo carbono. A Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu planos de descarbonização e de expansão de energias renováveis para 2050, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) a zero, visando atingir a neutralidade de carbono. Essa transição energética e os esforços para cumprir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) exigirão grandes quantidades de

minerais, tanto da mineração metálica quanto da mineração não metálica. Esse aumento na demanda, provavelmente, estará refletido nas barragens de mineração existentes no mundo, que em alguns casos superam os 100 metros de altura, chegando atualmente a 200 metros no Chile e no Peru (CACCIUTTOLO et al., 2023).

Neste cenário, monitorar a gestão estrutural e a segurança das barragens de mineração exige não apenas o uso das melhores tecnologias, mas também a adoção de critérios aprimorados de acompanhamento. Em sua tese, Fernandes (2020) conclui que, embora a compreensão do comportamento das barragens tenha melhorado ao longo dos anos, elas ainda continuam a apresentar falhas. Portanto, a capacitação dos profissionais e a aplicação de tecnologias inovadoras precisam ser acompanhadas de um monitoramento estratégico das estruturas, com foco nos mecanismos que podem desencadear falhas. Assim, o conhecimento dos modos de falha aplicáveis às barragens de mineração é essencial para um monitoramento eficaz, visando a prevenção de acidentes.

Diversos documentos (ICOLD, 2001; Rico et al., 2008; Zhang et al., 2009) investigam as causas de ruptura com base em acidentes ocorridos em barragens de mineração. Na tentativa de compilar e organizar as diversas causas apresentadas na literatura, Taguchi (2014) agrupa as causas identificadas por ICOLD (2001) e Rico et al. (2008) em cinco modos de falha distintos: galgamento, erosão interna, liquefação estática, instabilização estática e instabilização sísmica. A esses modos, Clarkson & Williams (2021) acrescentam o modo de falha pela ruptura da fundação.

Nos subitens seguintes, serão discutidos em detalhe cada um desses modos de falha listados, abordando suas características e causas.

3.3.1 **Falha na Fundação**

O desempenho inadequado da fundação de uma barragem de mineração está relacionado a diversos fatores locais, incluindo fissuras e pontos fracos em estruturas geológicas, bem como a presença de argila mole. Conforme, Clarkson (2021), este tipo de falha está diretamente relacionado à resistência ao cisalhamento, à permeabilidade e à compressibilidade do solo de fundação.

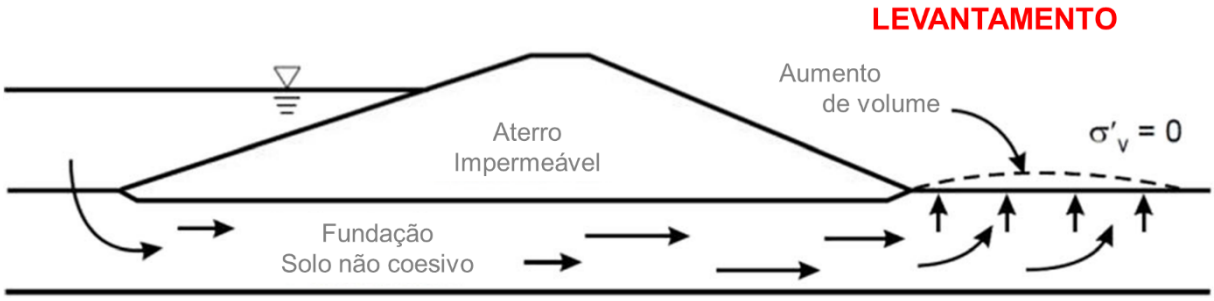
No que diz respeito à permeabilidade, Clarkson (2021) aponta dois comportamentos distintos das fundações das barragens, dependendo de sua

permeabilidade. Em fundações de baixa permeabilidade, à medida que há um aumento na carga, essa carga é inicialmente suportada pela água presente nos poros da fundação. Contudo, esse incremento de carga pode induzir a falha da fundação, uma vez que não ocorre um aumento imediato correspondente na resistência ao cisalhamento.

Adicionalmente, Clarkson (2021) descreve que, em fundações permeáveis o fluxo de água através do solo pode gerar um gradiente de pressão capaz de erodir o material na base da fundação, ocasionando o fenômeno conhecido como piping.

Para fundações compostas por solos não coesivos, quando o gradiente crítico é atingido, a pressão da água nos poros se iguala ao peso unitário submerso do solo, resultando em uma tensão efetiva nula. Nesse cenário, o material da fundação pode ser deslocado, fenômeno que pode ser descrito como “areia movediça”, conforme ilustrado na Figura 3.17.

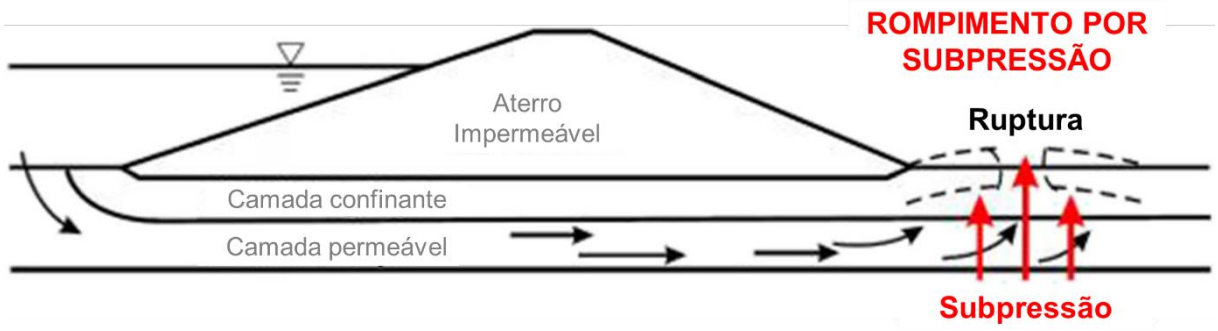
Figura 3.17 - Elevação próximo ao pé do talude jusante de uma barragem, causado por fluxo de água



Fonte: Clarkson (2021)

Em fundações heterogêneas, compostas por uma camada de baixa permeabilidade confinando uma camada permeável, o potencial de falha ocorre quando as pressões de infiltração através da camada permeável superam as pressões de sobrecarga na ponta a jusante. Isso pode resultar na ruptura da camada confinante, como ilustrado na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Ruptura da camada da fundação causado por fluxo de água



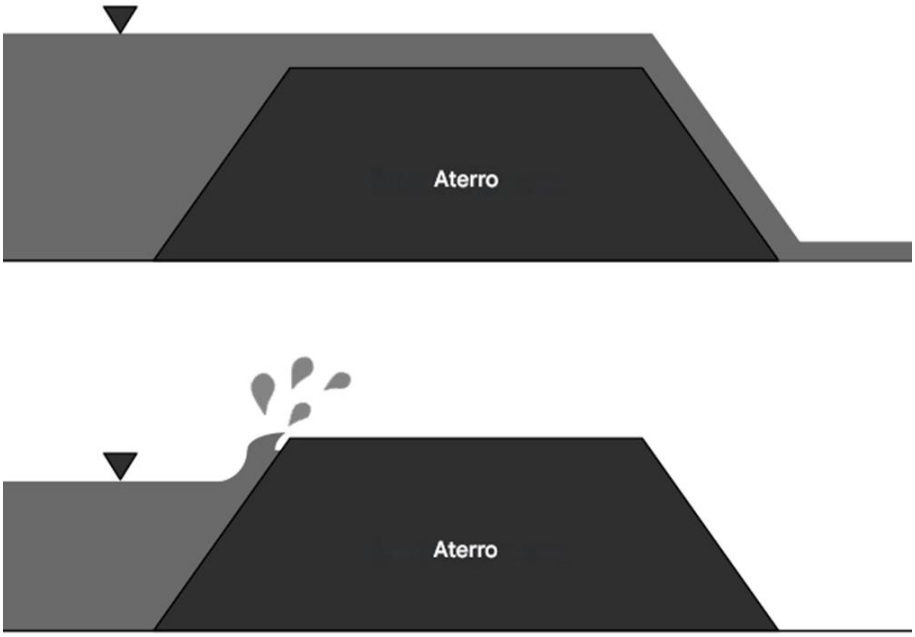
Fonte: Clarkson (2021)

3.3.2 **Galgamento**

Galgamento consiste no rompimento da estrutura pelo escoamento de água sobre a crista do maciço. Segundo Marinaro (2023), barragens e diques podem sofrer galgamento devido à passagem de um fluxo contínuo de água (*sustained overtopping*), quando a elevação do lago supera a elevação da crista da estrutura, ou pela ação de ondas provocadas pela incidência de vento (*wave overtopping*), conforme apresentado na Figura 3.19.

Devido à baixa resistência à erodibilidade, causada pelo fluxo de água na superfície do aterro, barragens de terra, mesmo quando revestidas com vegetação, geralmente não são capazes de suportar galgamentos significativos por fluxo contínuo de água. Assim, o galgamento por fluxo contínuo tende a resultar em falhas mais graves do que aquele provocado pela ação de ondas.

Figura 3.19 - Diagrama esquemático de (a) galgamento de fluxo continua e (b) galgamento por ondas



Fonte: Taguchi (2014)

Esse modo de falha está associado à capacidade inadequada do vertedouro, bloqueio do vertedouro, deslizamento de terra ou rocha para dentro do reservatório, erro de projeto ou recalque excessivo da estrutura, resultando na erosão do aterro (Bureau of Reclamation, 2014). Além disso, a ocorrência de grandes eventos climáticos pode agravar essa situação (Taguchi, 2014).

3.3.3 **Erosão interna**

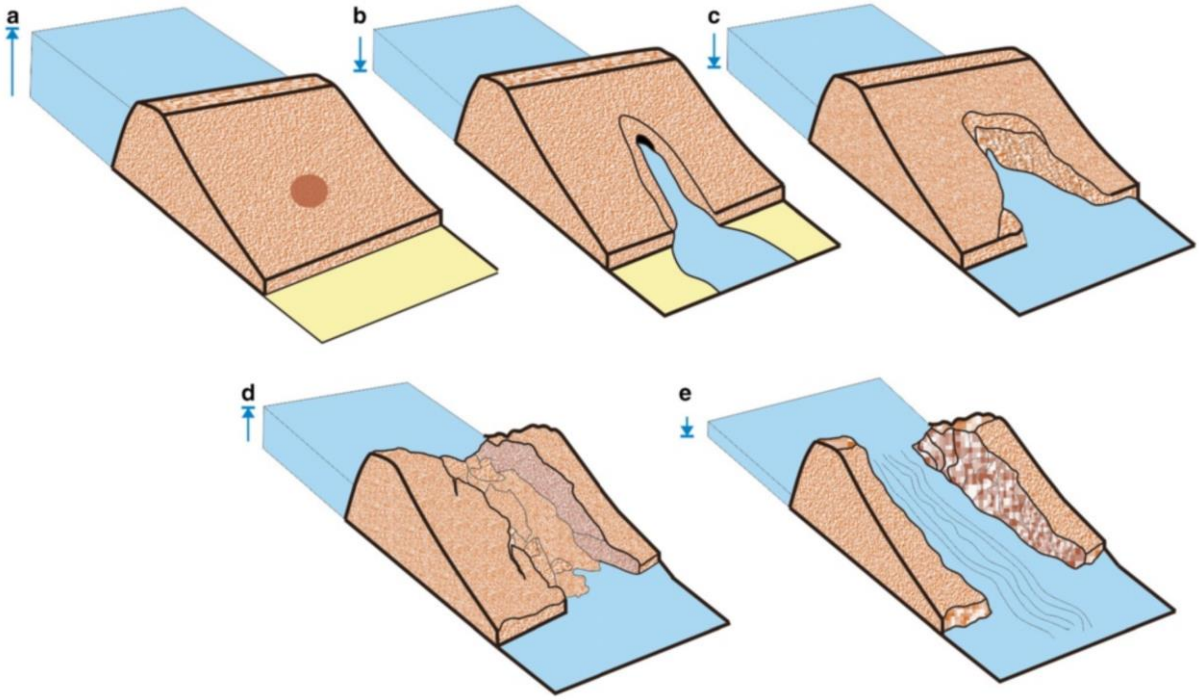
De acordo com o U.S. Department of the Interior (2013 apud Marinaro, 2022), a erosão interna refere-se ao transporte de partículas do solo pelo fluxo de água no maciço ou na fundação da barragem de rejeito. Os mecanismos de erosão interna descritos no documento incluem: erosão regressiva (*piping*), migração interna (*stoping*) e instabilidade interna (*suffusion*).

O piping é o fenômeno mais observado e consiste em um fluxo de água localizado, gerando uma força de percolação que arrasta partículas sólidas do maciço ou fundação, criando tubos de passagem de água conectados com o reservatório. Esse fenômeno inicia-se quando a força de percolação passa a ser maior que a força de atrito resistente ao movimento da água no solo. Em geral, é um fenômeno rápido e de grande potencial de dano para a estrutura da barragem. Marinaro (2023) associa a ocorrência de piping a quadro condições: (1) fonte de água e passagem de fluxo; (2)

saída do fluxo desprotegida e ausência de filtro; (3) material erodível ao longo do percurso do fluxo; e (4) presença de material com capacidade de suportar a formação do tubo.

Okeke et al. (2016) descreveu o processo de ruptura por piping em barragem de solo em quatro estágios (Figura 3.20), que incluem aparecimento de uma mancha úmida na encosta a jusante, evolução da tubulação(buraco) no talude, alargamento do furo da tubulação, brecha temporária com o colapso da crista e formação da brecha final. O surgimento da umidade concentrada em um ponto no talude de jusante é considerado o fim da erosão interna (em direção à montante).

Figura 3.20 - Estágios do processo erosivo mostrando: (a) Erosão interna e desenvolvimento do ponto úmido; (b) evolução da tubulação(buraco) no talude; (c) alargamento do furo da tubulação; (d) Brecha temporária com o colapso da crista; (e) Formação da brecha final



Fonte: Okeke et al. (2016)

De acordo com Garner e Fannin (2010 apud Taguchi, 2014), o processo de erosão interna se inicia devido à ocorrência simultânea de três fatores, quais sejam:

- Susceptibilidade do material: a relativa resistência à erosão (plasticidade) e dispersividade de um solo e, portanto, relacionada ao tamanho e formato dos grãos que compõem o solo;
- Estado de tensões crítico: diz respeito à incapacidade de resistir à erosão interna devido à magnitude da tensão efetiva no interior do

maciço, sabendo que que a tensão varia espacial e/ou temporalmente dentro do corpo da barragem;

- Carga hidráulica crítica: está relacionada com a energia hidráulica necessária para provocar o movimento das partículas. Em outras palavras, este fator está relacionado aos gradientes e velocidades de infiltração presentes no aterro ou fundação e se eles são suficientes para induzir a erosão interna.

3.3.4 **Liquefação estática**

A liquefação estática é um mecanismo de ruptura importante em taludes e, eventualmente, em fundações. Esse fenômeno consiste na redução da resistência ao cisalhamento de um material quando submetido a carregamentos monotônicos, cíclicos ou dinâmicos a volume constante. Isso resulta em grandes deformações, diminuição da viscosidade e provoca um comportamento fluido do material.

Conforme Texeira (2023), para que esse fenômeno ocorra, é necessário que o solo esteja saturado e tenha um comportamento contrátil (*strain-softening*), o que implica que a poropressão seja positiva e a resistência não drenada seja menor do que a resistência drenada. Solos com comportamento dilatante, por outro lado, apresentam poropressões negativas na ruptura e a resistência não drenada maior do que a resistência drenada, não estando, em princípio, sujeitos à liquefação. Vale ressaltar que não é suficiente que o solo seja contrátil para que ocorra liquefação. Para que o fenômeno se efetive, o solo deve estar praticamente saturado e a resistência desenvolvida deve ser menor do que as tensões aplicadas na massa de solo ou nas superfícies potenciais de falha. Caso a resistência seja maior, a liquefação não ocorrerá.

A liquefação pode ocorrer em materiais granulares, sem coesão, saturados e com comportamento contrátil quando submetidos a carregamentos suficientemente rápidos. Estudos em campo e laboratório mostram a suscetibilidade à liquefação não apenas em areias, mas também em siltes não plásticos e pedregulhos envolvidos por silte e argila (GUILLEN, 2004). O carregamento que desencadeia o processo é denominado gatilho, podendo ser um carregamento estático (como o peso próprio de aterros) ou dinâmico (como os sismos).

Na prática, a liquefação pode ser considerada um caso particular de estabilidade, no qual o solo é demandado considerando sua resistência não drenada. Maiores detalhes sobre a liquefação estática podem ser encontrados nos trabalhos de Duncan & Wright (2005), Fell et al. (2007) e Jefferies e Been (2016).

3.3.5 **Instabilização estática**

O modo de falha por instabilização estática ocorre quando as tensões solicitantes no talude de um maciço superam as tensões de resistência ao cisalhamento, resultando em ruptura e movimentação de massa. A quantificação do risco dessa ruptura é determinada pelo fator de segurança, que consiste na razão entre a resistência do solo ao cisalhamento e a tensão solicitante ao longo de uma superfície de ruptura potencial.

A quantificação do fator de segurança resulta em três possíveis condições, conforme descrito na Tabela 3.8. Embora o fator de segurança acima de 1,0 indique estabilidade, em projetos de engenharia é adotado um fator de segurança admissível, que é um valor mínimo a ser atendido pela obra, com base no seu potencial de dano e vida útil. Para barragens de rejeito, os fatores de segurança são definidos pela NBR 13.028/2024, conforme a Tabela 3.9.

Tabela 3.8 - Significado do fator de segurança em relação a estabilidade

Coeficiente de segurança (FS)	Condição do Talude
FS < 1,0	Talude instável – não tem significado físico
FS = 1,0	Condição limite de estabilidade – iminência de ruptura
FS > 1,0	Talude estável

Tabela 3.9 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração

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

Fase	Tipo de ruptura	Fator de segurança mínimo
Solicitação sísmica, em condição de N.A do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor) [c]	Maciço e fundações	1,1

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

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

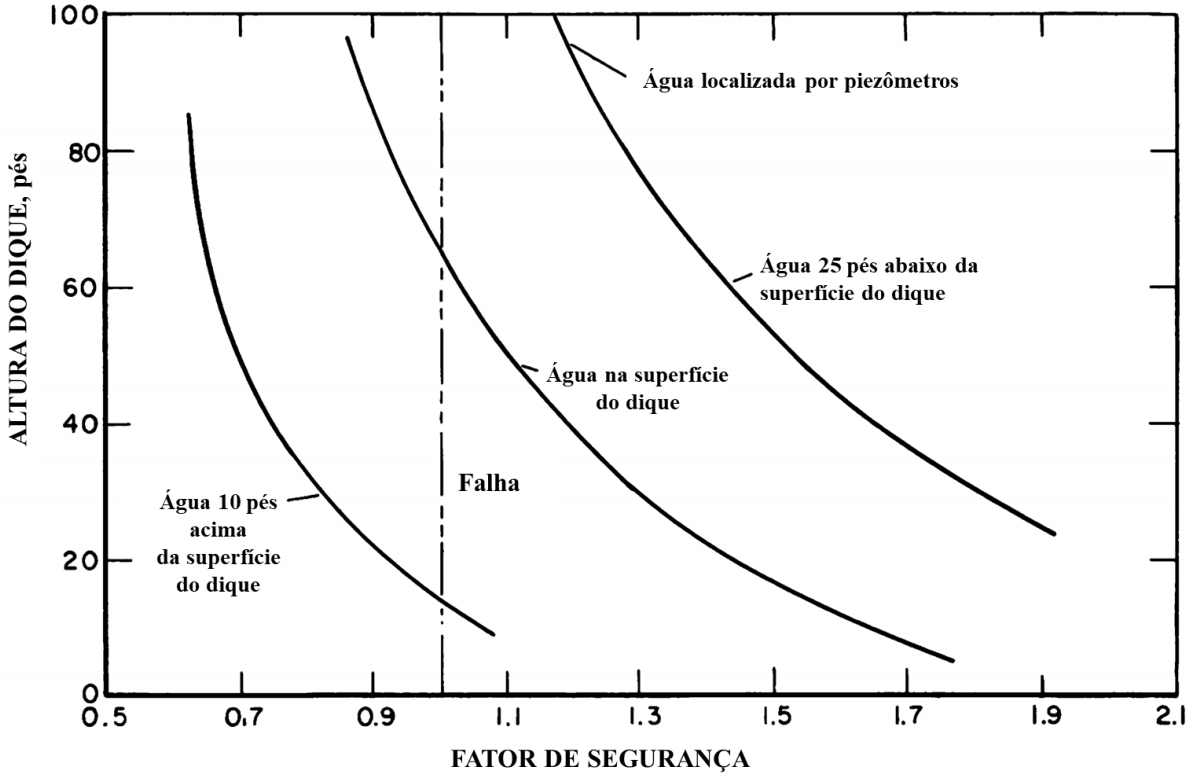
c. A análise pseudoestática é uma abordagem simplificada de equilíbrio limite, sendo que deve ser complementada por análises de tensão-deformação (condições dinâmicas), a critério e julgamento de engenharia apropriado ou quando os valores de fatores de segurança obtidos estiverem muito próximos ou inferiores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

Fonte: NBR 13.028/2024

Quanto às causas desse modo de falha, Caputo (2019) as classifica em duas categorias: causas externas, em que há um "aumento" de peso do talude e/ou das cargas aplicadas, e causas internas, em que há uma "diminuição" da resistência ao cisalhamento do material. Constata-se, portanto, que a resistência ao cisalhamento do solo está diretamente relacionada com as tensões efetivas, ou seja, quanto menores as tensões efetivas, menor será a resistência. A tensão efetiva é a diferença entre as tensões totais e as poropressões no ponto, conforme o princípio de Terzaghi. Assim, as condições de fluxo através do maciço afetam diretamente sua estabilidade.

Nesse contexto, Kealy e Busch (1971) apresentam um comparativo do fator de segurança de uma barragem de rejeito alteada por montante para diferentes níveis de superfícies freáticas. A Figura 3.21 apresenta esse comparativo, evidenciando a variação significativa do fator de segurança em relação à superfície freática.

Figura 3.21 - Fator de Segurança em relação a piezometria e altura em barragens



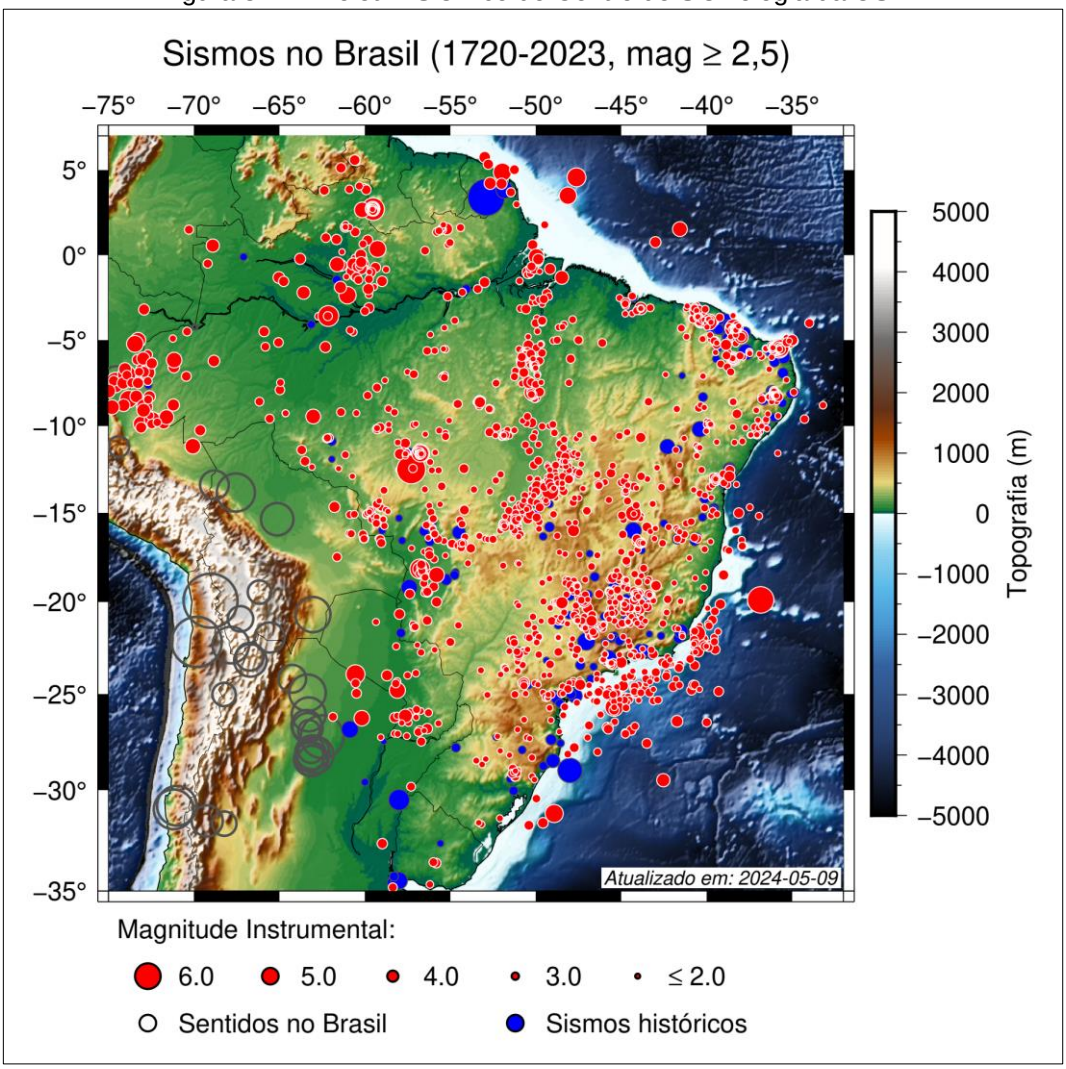
Fonte: Kealy e Busch (1971)

3.3.6 **Evento Sismo**

Este modo de falha está relacionado à desestabilização do talude do maciço provocada por carregamentos cíclicos resultantes de terremotos ou outros eventos sísmicos (Taguchi, 2014). Esses carregamentos dinâmicos podem gerar deformações permanentes no barramento e, dependendo das características dos materiais envolvidos, podem desencadear outros modos de falha, como a liquefação.

No Brasil, o Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (USP) divulgou, em 9 de maio de 2024, um boletim sísmico atualizado com a reanálise de seu catálogo de eventos. O documento apresenta informações tabuladas sobre coordenadas, hora de origem e magnitude dos terremotos registrados no país até 31 de dezembro de 2023, conforme detectados e analisados pelo Centro de Sismologia. A Figura 3.22 apresenta o boletim, que inclui eventos até 31 de dezembro de 2023.

Figura 3.22 - Boletim Sísmico do Centro de Sismologia da USP



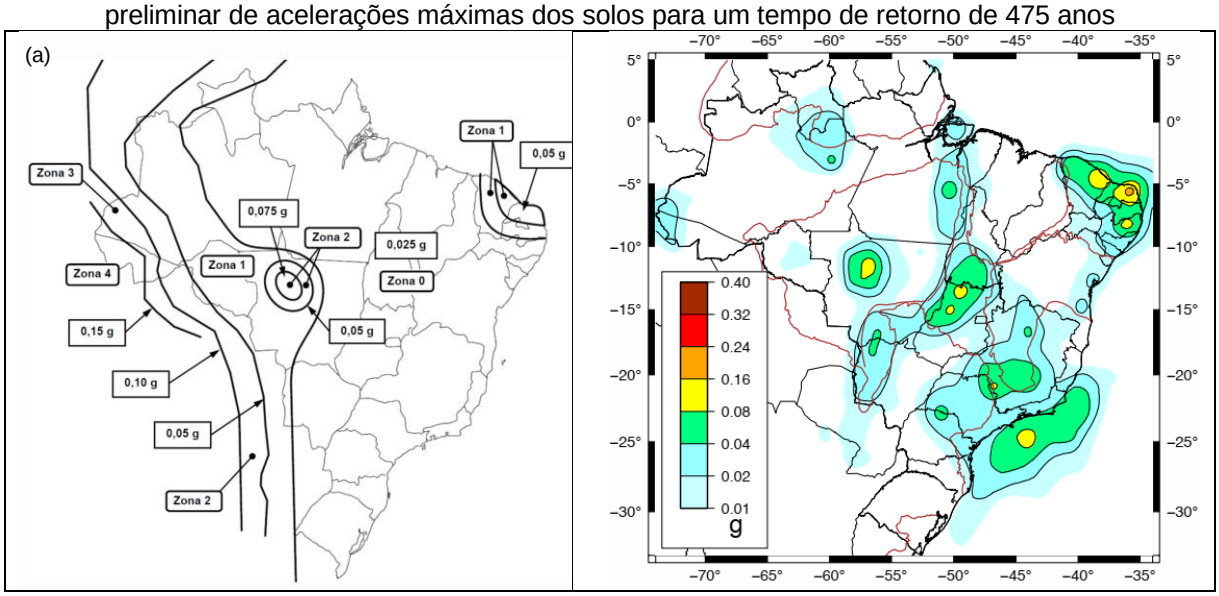
Fonte: Centro de Sismologia da USP (2024)

Com a atualização da norma ABNT NBR 13.028 em 2017, tornou-se obrigatório realizar estudos sísmicos para barragens de mineração no Brasil. A norma estabelece que os estudos devem avaliar o potencial de sismicidade na área de implantação da barragem, com base em referências bibliográficas, normas existentes e registros sísmicos. Apesar de não indicar um método específico para quantificar as ações sísmicas, recomenda-se o uso dos critérios das diretrizes da Canadian Dam Association (CDA) nas etapas iniciais de estudo.

Segundo Alves (2020), a análise de ameaça sísmica (Seismic Hazard Analysis – SHA) considera parâmetros de movimentação do solo, como aceleração de pico (PGA), velocidade de pico (PGV) e aceleração espectral (SA), com base em eventos sísmicos passados, para prever valores futuros desses parâmetros. Partindo desse entendimento, a norma ABNT NBR 15.421, revisada em 2023, apresenta um mapeamento da aceleração sísmica horizontal para substratos rochosos no Brasil

conforme Figura 3.23(a). Outras propostas recentes, como as de Assumpção et al. (2016), Figura 3.23(b), utilizam métodos probabilísticos para estimar as máximas acelerações de terreno esperadas no Brasil, considerando os registros do catálogo sísmico brasileiro.

Figura 3.23 - (a) Mapa da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para rocha (b) Mapa preliminar de acelerações máximas dos solos para um tempo de retorno de 475 anos



Fonte: (a) NBR 15421/2023 (b) Pereira (2021) adaptado de Assumpção et al. (2016).

É relevante destacar que as vibrações sísmicas observadas em substratos terrosos podem ser significativamente amplificadas em comparação às de substratos rochosos, devido à menor rigidez dos primeiros. Para considerar esses efeitos, metodologias que estimam à amplificação da aceleração no corpo das barragens foram desenvolvidas, como Papadimitriou et al. (2014) e Bray e Macedo (2019).

3.4 MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO

As barragens de mineração são estruturas projetadas para ter uma longa vida útil, frequentemente permanecendo em operação muitos anos após a conclusão das atividades mineradoras, com a finalidade de reter os rejeitos e sedimentos gerados durante esse processo. Em virtude dessa durabilidade, o monitoramento contínuo dessas estruturas é essencial para garantir sua segurança ao longo do tempo.

3.4.1 **Instrumentação de Monitoramento em Barragens de Rejeito**

O monitoramento refere-se ao processamento de sinais captados por sensores para a detecção e diagnóstico de falhas ou anomalias. Na prática, o monitoramento por instrumentação busca fornecer informações detalhadas sobre o comportamento estrutural, contribuindo para o entendimento do desempenho, esclarecendo dúvidas de projeto e prevenindo problemas ou falhas. De acordo com Clarkson (2020), não houve uma única ruptura de barragem de rejeitos na história que, em retrospectiva, não fosse previsível com as informações disponíveis. Assim, os dados obtidos por sistemas de instrumentação são essenciais para a avaliação e a manutenção da segurança das barragens de mineração.

Os riscos e consequências de rupturas de barragens exigem melhorias constantes nos equipamentos de monitoramento e na interpretação de dados pelos profissionais responsáveis. No modelo tradicional de coleta de dados manuais, é necessário que os profissionais se desloquem ao local, realizem as medições, transfiram os dados para um sistema, processem e interpretem essas informações, antes de emitir relatórios. Dunnicliff (1993) categoriza esse processo em cinco etapas: coleta, processamento, apresentação, interpretação e elaboração de relatórios.

Clarkson (2021) identifica três riscos inerentes ao processo de coleta manual de dados: o intervalo entre as leituras, o potencial de erro humano e o acesso perigoso ao local da instrumentação. O intervalo entre leituras, que em instrumentações manuais pode variar de semanal a mensal, aliado ao tempo necessário para coleta e interpretação dos dados, compromete o monitoramento em tempo real da estrutura. O erro humano, por sua vez, pode ocorrer devido à complacência ou falhas involuntárias, afetando a precisão das medições. Já o acesso perigoso está relacionado a situações em que a estrutura é instável, tornando arriscado expor profissionais à coleta de dados.

A automação da coleta e do processamento das leituras mitiga esses riscos, permitindo maior frequência de medições, reduzindo a interferência humana e eliminando a necessidade de acesso físico a áreas instáveis. Quando comparada à coleta automatizada, a manual apresenta deficiências como:

- Atrasos entre leituras, dificultando a detecção de tendências de deterioração.

- Alta demanda de mão de obra para coleta e processamento de dados.
- Menor capacidade de identificar defeitos na instrumentação ou falhas de calibração.
- Ritmo lento na análise de dados, insuficiente para acompanhar o avanço rápido de problemas estruturais.

Dunnicliff (1993) observa que, em muitos casos, empresas acumulam grandes volumes de dados parcialmente processados ou não analisados devido à falta de tempo ou recursos. Nesse sentido, os avanços em sistemas de monitoramento automatizado não apenas aceleram as etapas de coleta e processamento, mas também liberam mais tempo para análises críticas. Contudo, a interpretação final dos dados ainda depende do engenheiro responsável, como afirma Fell et al (2015): “a delicada tarefa de interpretação refinada pertence ao engenheiro”.

Clarkson (2020) destaca dois benefícios do monitoramento em tempo real possibilitado pela automação:

- Perspectiva futura: permite a identificação precoce de tendências inseguras, possibilitando ações preventivas como reparos ou evacuações.
- Perspectiva retrospectiva: o registro centralizado de dados, com mínima interferência humana, facilita análises que avaliam o desempenho atual da barragem em comparação com o projetado.

Apesar dessas vantagens, no Brasil, apenas grandes barragens utilizam instrumentação automatizada, mesmo que sua adoção seja uma exigência legal. Questões financeiras frequentemente limitam o investimento em tecnologias avançadas, já que estruturas como barragens de rejeito não geram lucro direto. Clarkson (2020) argumenta que, embora a segurança não deva ser separada das finanças, é necessário garantir investimentos em sistemas práticos e eficazes.

Dunnicliff (1993) reforça que, embora programas de instrumentação possam reduzir custos de construção diretamente, sua justificativa não depende disso. Em alguns casos, a instrumentação valida o projeto original; em outros, aponta inadequações, levando ao aumento dos custos. Ainda assim, o valor da segurança adicional, a prevenção de falhas e a economia no custo de reparos compensam esses investimentos.

3.4.2 **Legislação associada a Instrumentação**

A Resolução 95 da ANM, alterada em 2024, estabelece a obrigatoriedade de o empreendedor manter um sistema de monitoramento da segurança da barragem e suas características. Dependendo do Dano Potencial Associado (DPA) da barragem, esse sistema deve incluir instrumentação automatizada e vídeo-monitoramento. Abaixo, destacam-se trechos da Seção IV, artigo 7º dessa resolução:

> § 1º Para as barragens de mineração classificadas com DPA alto, o empreendedor é obrigado **a manter sistema de monitoramento automatizado de instrumentação,** adequado à complexidade da estrutura, com acompanhamento em tempo real e período integral, incluindo redundância no sistema de alimentação de energia, seguindo os critérios definidos pelo projetista**, sendo de responsabilidade do empreendedor a definição da tecnologia, dos instrumentos e dos processos de monitoramento**
>
> § 2º As informações advindas do sistema de monitoramento, contemplando os dados de instrumentação, devem **ser armazenadas e estar disponíveis para a fiscalização** das equipes ou sistemas das Defesas Civis estaduais e federais e da ANM, sendo que **para as barragens de mineração com DPA alto, estas devem manter vídeo-monitoramento 24 (vinte e quatro) horas por dia de sua estrutura devendo esta ser armazenada pelo empreendedor pelo prazo mínimo de 90 (noventa) dias.**
>
> § 3º Quando ocorrer a reclassificação da barragem para DPA Alto, o empreendedor **disporá de 1 (um) ano para atendimento** ao disposto neste artigo.

Além disso, a resolução classifica as barragens de acordo com sua categoria de risco, considerando os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidentes ou desastres. Entre os critérios de classificação, a instrumentação e a emissão de relatórios de monitoramento recebem pontuação, sendo aplicadas penalidades às barragens que não cumprirem esses requisitos. Elementos relevantes para o estudo, como a presença de sistemas de drenagem e surgências, também são considerados na pontuação.

3.4.3 **Modos de Falha associado a Instrumentação**

A implementação de instrumentação geotécnica deve ser objetivamente associada às informações específicas a serem coletadas, independentemente da obra geotécnica em questão. O monitoramento eficaz deve ser direcionado para responder a questões previamente definidas, como destaca Silveira (2006): “se não há

perguntas, não deve haver instrumentação”. Na prática, em obras geotécnicas, sempre há questionamentos relacionados ao comportamento do solo, como respostas ao carregamento, ao nível de água e a outras condições.

Em barragens, é crucial esclarecer os pontos mais suscetíveis à ruptura para garantir a segurança estrutural e prevenir falhas. Nesse contexto, a ICOLD (1983) identificou métodos de monitoramento frequentemente utilizados para detectar deteriorações em barragens de aterro. Entre os métodos mais aplicados, com porcentagem acima de 2%, destacam-se:

- 63% Observação direta (inspeção visual);
- 13% Medições de vazão de água;
- 6% Medições de deslocamento vertical;
- 5% Medições de deslocamento horizontal;
- 5% Medições de pressão dos poros; e
- 2% Medições de nível freático.

Com exceção da inspeção visual, todos os métodos de monitoramento podem ser associados ao uso de instrumentação geotécnica. Além disso, os instrumentos possibilitam o monitoramento de sismicidade e condições climáticas locais, aspectos fundamentais para a segurança de barragens de mineração, especialmente frente às recentes mudanças climáticas e eventos sísmicos que podem atuar como gatilhos de rupturas. Vale destacar que, mesmo a inspeção visual pode ser aprimorada com o uso de tecnologias como drones, que permitem visualizar regiões de alto risco com maior eficiência e segurança.

Clarkson (2021) relacionou os principais parâmetros monitorados em barragens de mineração e sua utilidade como indicadores de diferentes modos de falha, conforme apresentado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Classificação da utilidade dos dados de monitoramento para identificação de diferentes modos de falha.

Modos de Falha / Parâmetro	Falha na Fundação	Erosão Interna e Piping	Galgamento	Infiltração	Evento Sismo / Liquefação	Instabilidade do Talude
Superfície Freática	Apoio	Apoio	Direto	Direto	Apoio	Apoio
Poropressão	Direto	Apoio	NR	Direto	Apoio	Direto
Fluxo de Infiltração	Direto	Direto	NR	Direto	Apoio	Direto
Deformação e Deslocamento	Apoio	Apoio	Apoio	Apoio	Apoio	Direto
Sismicidade	Apoio	Direto	Apoio	NR	Direto	Direto
Tensões da Terra	Direto	NR	NR	NR	NR	Direto
Clima	Apoio	Apoio	Apoio	Apoio	Apoio	Apoio

Fonte: Clarkson (2021)

Notas:
Direto: São indicadores que fornecem uma medição direta dos parâmetros que se espera que mudem em caso de instabilidade (por exemplo, a deformação da face da barragem para baixo e para fora pode indicar instabilidade do talude);
Apoio: São indicadores que fornecem uma medição secundária de parâmetros que podem ser influenciados através do início e/ou progressão da instabilidade (por exemplo, o recalque da crista da barragem, embora considerado principalmente como comportamento de deformação, também pode reduzir o bordo livre e encorajar o galgamento);
NR: Indicador não recomendado. Recomenda-se usar parâmetros diferentes para medida para esta métrica chave de desempenho específica.

3.4.4 **Tipos de instrumentos**

A instrumentação de barragens engloba medições de tensões, deformações, percolação, poropressões, temperaturas, entre outros parâmetros. Nesta dissertação, serão detalhados os instrumentos relacionados à avaliação de percolação e poropressões, incluindo, portanto, indicadores de nível d'água, piezômetros e medidores de vazão.

3.4.4.1 Medidor de vazão

A quantificação do fluxo de água através de um aterro é um dos principais indicadores de desempenho de uma barragem. Infiltrações não controladas podem levar a falhas, como carreamento de materiais (piping), desestabilização de taludes, elevação da fundação e perdas excessivas de água.

Para compreender o comportamento do fluxo de infiltração, diversos instrumentos estão disponíveis, muitos dos quais permitem medições em tempo real. Os mais utilizados em barragens de rejeitos incluem os medidores de vazão tipo vertedouro e as calhas Parshall.

O medidor de vazão do tipo vertedouro consiste em uma placa metálica com geometria específica, instalada perpendicularmente ao fluxo no final de um canal. Já a calha Parshall possui uma seção de entrada convergente, um estrangulamento e uma seção de saída divergente, seguindo critérios específicos de projeto. Ambos os instrumentos podem ser equipados com sensores ultrassônicos para coleta de dados em tempo real ou com frequência horária.

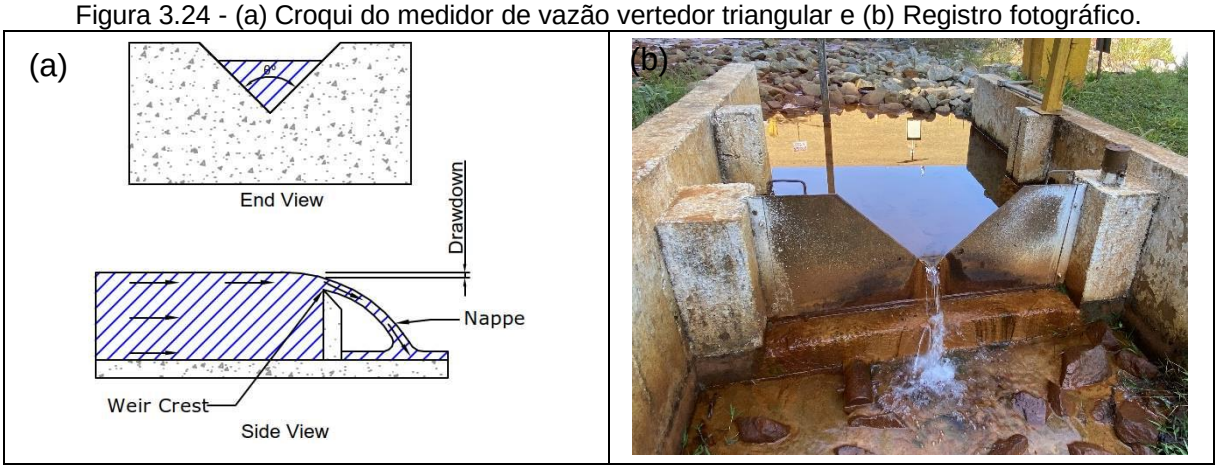
A Tabela 3.11 e a Tabela 3.12 apresentam, respectivamente, os instrumentos mencionados com seus parâmetros de medida, vantagens e desvantagens. Quanto a Figura 3.24 e a Figura 3.25, fornecem exemplos ilustrativos, por meio de croquis e registros fotográficos.

Tabela 3.11 - Tabela Resumo do Medidor de Vazão de Face Plana

Instrumento	Medidor de Vazão de Face Plana
Parâmetro Medido	Fluxo de infiltração
Vantagens	Desvantagens
• Simples e confiável • Barato • pouca manutenção • requisitos mínimos de espaço no ponto de medição Obs.: Basicamente existem três formas de perfil para o vertedor, triangular (ou passagem em V), quadrado ou trapezoidal (Cipolletti), que são escolhidas a depender do volume a ser medido pelo medidor de vazão.	• Restrição severa do canal de fluxo • Perda de carga relativamente alta • Mudança de elevação suficiente necessária para evitar que a água residual submerja a barragem • Suscetível a danos ou entupimento por detritos (embora o acúmulo de sedimentos seja útil para avaliar o movimento do material) • Suscetível a alterações ou restrições na hidráulica a jusante • Recomendado para medir apenas fluxos em temperaturas comuns (3,9 a 30 °C)

Fonte: Adaptado de SILVEIRA (2006) e Clarkson (2021)

Figura 3.24 - (a) Croqui do medidor de vazão vertedor triangular e (b) Registro fotográfico.



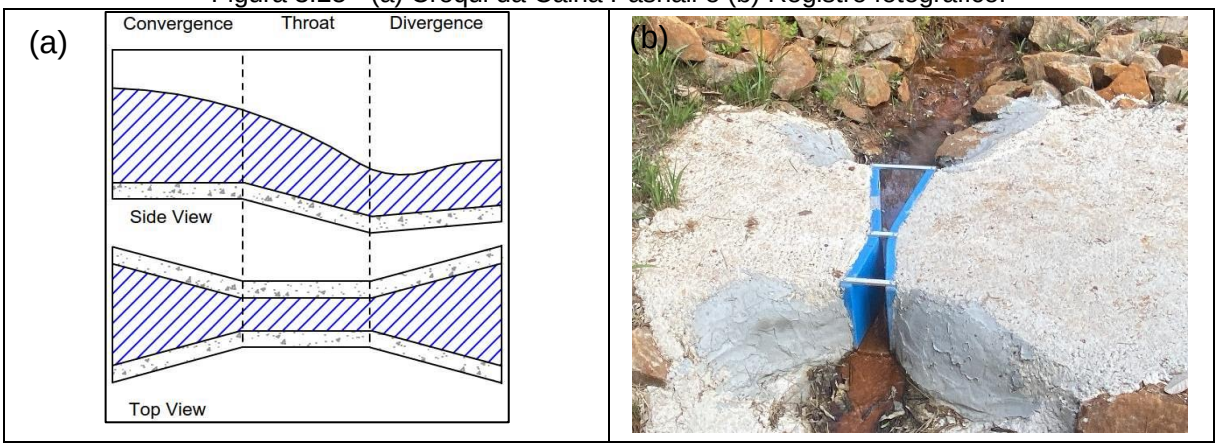
Fonte: (a) Clarkson (2021) e (b) Autor (2025)

Tabela 3.12 - Tabela Resumo da Calha Pashall

Instrumento	Calha Pashall
Parâmetro Medido	Fluxo de infiltração
Vantagens	Desvantagens
• Simples e confiável. • Pouca manutenção. • Restrição mínima ao canal de fluxo e baixa perda de carga. • Vantagens sobre vertedouros, como capacidade de medir taxas de fluxo mais altas, menos perda de carga, capacidade de passar detritos mais prontamente e manutenção menos rigorosa. • Resistente a mudanças ou restrições na hidráulica a jusante.	• • Instalação relativamente cara. • • Idealmente instalado em áreas livres de submersão a jusante.

Fonte: Adaptado de SILVEIRA (2006) e Clarkson (2021)

Figura 3.25 - (a) Croqui da Calha Pashall e (b) Registro fotográfico.



Fonte: (a) Clarkson (2021) e (b) Autor (2025)

3.4.4.2 Medidor de Nível de Água

Formado por um tubo de PVC perfurado, envolvido por material filtrante (manta geotêxtil ou tela), o indicador de nível de água é inserido em um furo de sondagem cujo espaço anelar é preenchido com material drenante, como areia, para evitar o fechamento do furo e o carreamento de material. No topo, utiliza-se um selo de solo-cimento para vedar o espaço entre o furo e o tubo, impedindo a entrada de água superficial ou pluvial no instrumento.

Esse dispositivo tem como objetivo medir a profundidade ou altura do nível freático em relação a um ponto de referência. Para tal, utiliza-se uma fita graduada conectada a um apito ou sonda elétrica, que emite sinais sonoros ao entrar em contato com a água, conforme Figura 3.26. Por sua simplicidade, o indicador de nível de água é um dos dispositivos básicos empregados em barragens.

A Tabela 3.13 apresenta um resumo das características desse instrumento, incluindo o parâmetro medido, vantagens e desvantagens. A Figura 3.27 ilustra o perfil típico de um indicador de nível d'água.

Figura 3.26 - Fita graduada para medição de nível freático

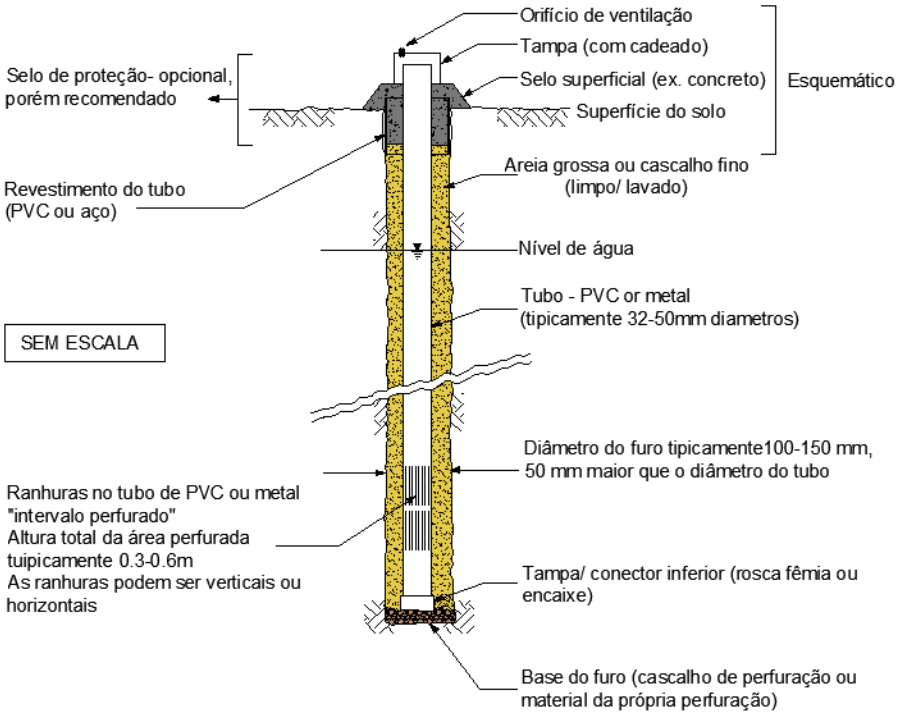
Fonte: GEOSENSE (2024)

Tabela 3.13 - Tabela Resumo de Indicador de Nível de Água

Instrumento	Indicador de Nível de Água
Parâmetro Medido	Nível Freático
Vantagens	Desvantagens [1]
• Método de instalação e construção simples e econômica; • Instrumento sólido, robusto e durável, necessitando de quase nenhuma manutenção de rotina; • Pode ser instalado de forma que a boca do instrumento fique posicionada dentro de uma caixa de passagem enterrada, tampada e com acesso restrito à equipe de monitoramento. • Não requer emprego de mão-de-obra especializada ou de materiais e equipamentos complexos;	• Este instrumento não mede poropressão ou carga piezométrica; • É somente útil para leitura de nível d'água em materiais homogêneos, onde não haja fluxos ascendentes ou descendentes; • Requer acesso direto do operador ao instrumento para sua leitura (exceto se automatizado por meio de um sensor de piezometria)

Fonte: Adaptado de CERQUEIRA (2017)

Figura 3.27 - Perfil típico de um indicador de nível d'água

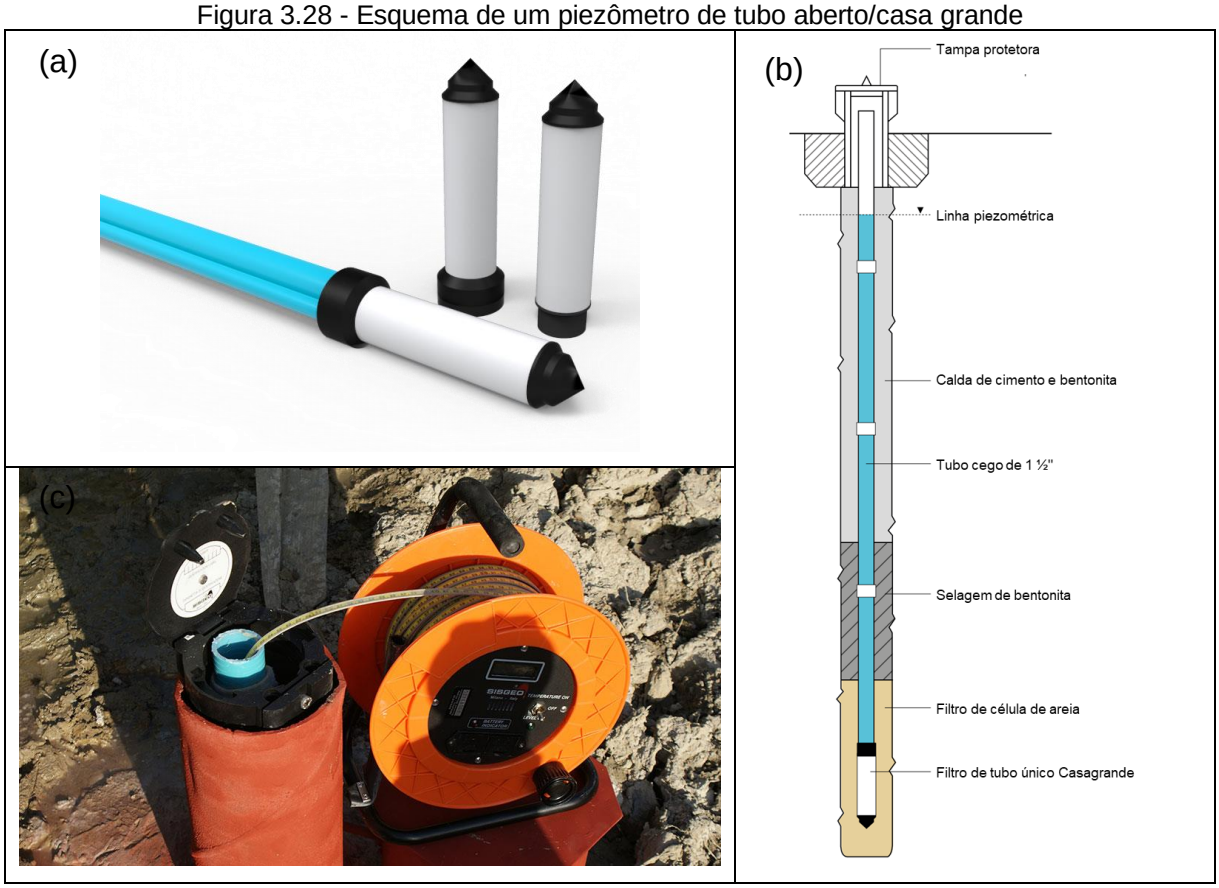


Fonte: CERQUEIRA (2017)

3.4.4.3 Piezômetro de Casagrande ou de tubo aberto

Semelhante ao indicador de nível de água, o piezômetro de Casagrande é composto por um tubo de PVC, mas sua extremidade inferior contém um elemento poroso, chamado bulbo Figura 3.28(a). Diferente do indicador de nível de água, o Piezômetro é preenchido por areia apenas em sua região inferior onde está localizado o bulbo, acima dessa região o espaço entre o tubo e terreno é selado com solo-cimento plástico ou bentonita. Dessa forma, o piezômetro de tubo aberto apresenta sua região drenante bem delimitada. A Figura 3.28(b) apresenta um esquema geral do piezômetro de casa grande instalado em um furo de sondagem.

Figura 3.28 - Esquema de um piezômetro de tubo aberto/casa grande



Fonte: Sisgeo (2024)

O piezômetro informa as pressões neutras (poro-pressões) em pontos específicos do maciço ou fundação da barragem. A coluna de água formada dentro do tubo reflete a pressão hidrostática no ponto de instalação do bulbo. Essa informação é essencial para verificar, por exemplo, o funcionamento do tapete drenante de uma barragem, que pode operar afogado ou não, dependendo da pressão registrada.

As medições podem ser realizadas manualmente, por medidor portátil como mostrado na Figura 3.28(c) ou automaticamente com um transdutor de pressão inserido no tubo vertical. Reconhecido por sua confiabilidade, o piezômetro de tubo aberto é amplamente utilizado em projetos de barragens, conforme descrito por Cruz (2004).

A Tabela 3.14 identifica o instrumento e seu parâmetro de medida. Além de pontuar suas vantagens e desvantagens.

Tabela 3.14 - Tabela Resumo Piezômetro de Casa Grande

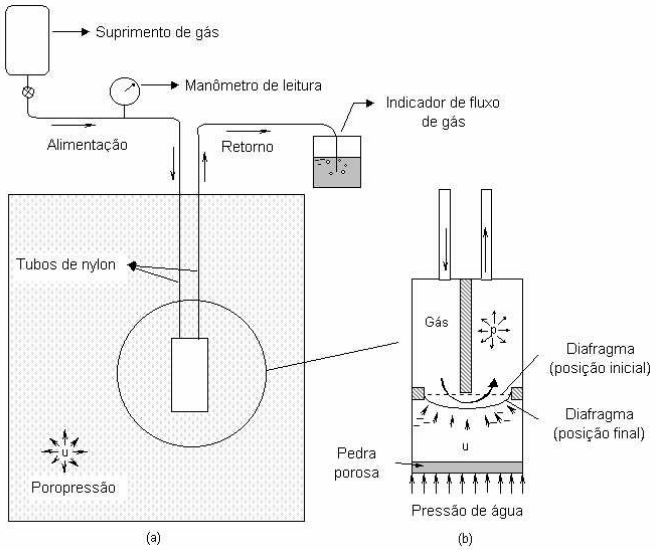
Instrumento	Piezômetro de Tubo Aberto
Parâmetro Medido	Poropressões, ou seja, Pressões neutras em maciços de terra, taludes e fundação
Vantagens	Desvantagens
• Dispositivo simples, confiável, barato e durável; • Possibilidade de verificação de seu desempenho por meio de ensaios de recuperação do NA; • Possibilidade de estimar o coeficiente de permeabilidade do solo onde se encontra instalado o instrumento; • Facilmente automatizado.	• Interferência da praça de compactação durante a construção da barragem; • Inadequação, geralmente, para a medição das pressões neutras de período construtivo; • Restrições quanto à sua instalação a montante da linha d'água; • Certa dificuldade de acesso aos terminais de leitura; • Baixa precisão e longo tempo de resposta em solos impermeáveis.

Fonte: SILVEIRA (2006) e Clarkson (2021)

3.4.4.4 Piezômetros Pneumáticos

O piezômetro pneumático consiste em uma pedra porosa conectada a dois tubos: um de retorno e um de alimentação. O tubo de retorno é ligado a um indicador de nível de gás, enquanto o tubo de alimentação se conecta a um suprimento de gás. A determinação da pressão da água no solo é realizada aplicando-se uma pressão crescente através do tubo de alimentação e medindo essa pressão pelo tubo de retorno. A pressão de retorno é monitorada até atingir zero, momento em que é possível determinar a pressão exercida pela água que passou pela pedra porosa. A Figura 3.29 apresenta esquematicamente o funcionamento desse piezômetro.

Figura 3.29 - Esquema(a) e detalhamento(b) do Piezômetro Pneumático ()



Fonte: Fonseca, 2003

Esse instrumento é especialmente útil durante a fase construtiva da barragem e em regiões de baixa permeabilidade, devido ao seu curto tempo de resposta em comparação ao piezômetro de Casa Grande. A Tabela 3.15 apresenta um resumo do piezômetro pneumático, incluindo seu parâmetro de medida, vantagens e desvantagens.

Tabela 3.15 - Tabela Resumo Piezômetros Pneumáticos

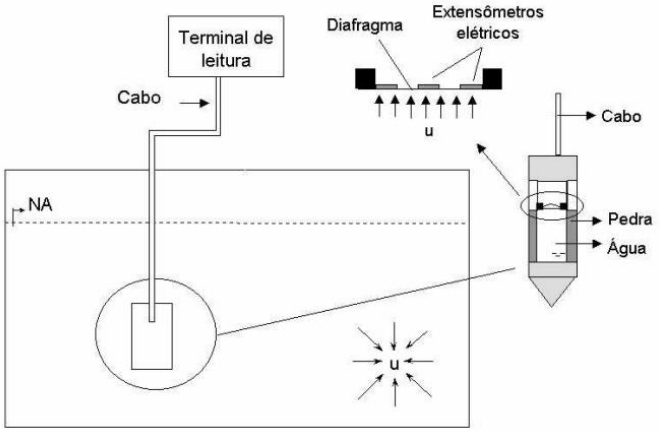
Instrumento	Piezômetro Pneumático
Parâmetro Medido	Poropressões, ou seja, pressões neutras e subpressões
Vantagens	Desvantagens
• Confiabilidade e simplicidade, • Rapidez das leituras, • Tempo de resposta relativamente pequeno, • Livre localização do aparelho de medições, • Tecnologia de construção não muito complexa, • Custo menor que o de outros piezômetros do tipo membrana • Poder ser instalados após a construção da obra.	• O equipamento de leitura é relativamente caro. • Problemas decorrentes da sua inadequação ou menor confiabilidade para medidas de pressões negativas, • Necessidade de recarregamento periódico das ampolas de gás comprimido • Menor sensibilidade que outros piezômetros do tipo membrana • A automação é complexa.

Fonte: Fonseca (2003) e Clarkson (2021)

3.4.4.5 Piezômetro Elétrico de Resistência

O piezômetro elétrico de resistência permite medições dinâmicas e registro contínuo de dados, destacando-se por apresentar um dos mais baixos tempos de resposta. Este instrumento é composto por um transdutor com diafragma de aço inoxidável, no qual são fixados extensômetros de resistência. A pressão da água é determinada pela deflexão do diafragma, acompanhada pela variação da resistência dos extensômetros. A Figura 2.28 ilustra a estrutura do piezômetro elétrico de resistência.

Figura 3.30 - Esquema do Piezômetro Elétrico de Resistência (



Fonte: Fonseca (2003)

A Tabela 3.15 apresenta o piezômetro pneumático, identificando seu parâmetro de medida, além de destacar suas vantagens e desvantagens. Segundo Cruz (2004), esse instrumento é particularmente útil para barragens situadas em regiões com sismicidade, devido à sua capacidade de fornecer leituras rápidas e precisas, essenciais para monitoramento em áreas sujeitas a atividades sísmicas.

Tabela 3.16 - Tabela Resumo Piezômetro Elétrico

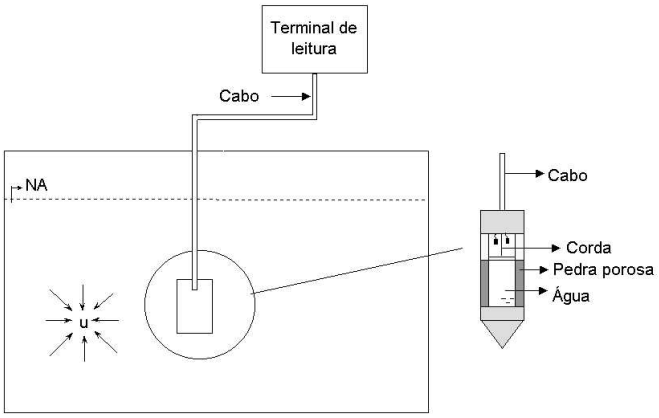
Instrumento	Piezômetro Elétrico de Resistência
Parâmetro Medido	Poropressões, ou seja, pressões neutras e subpressões
Vantagens	Desvantagens
• Apresentam os mais baixos tempos básicos de resposta • Efetua medidas dinâmicas de poropressão com registro contínuo • Facilidade automação de leituras	• Alto custo • Impossibilidade de recuperação em caso de danos • possibilidade de avarias devido a centelhamento (por sobretensões e descargas elétricas)

Fonte: CRUZ (2004) e FONSECA (2003)

3.4.4.6 Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante

O piezômetro elétrico de corda vibrante opera de maneira semelhante ao piezômetro elétrico de resistência. A água é conduzida através da pedra porosa até um diafragma interno, provocando sua deformação. No entanto, ao contrário do piezômetro de resistência, a deflexão é medida por um transdutor de corda vibrante instalado perpendicularmente ao diafragma, como mostrado na Figura 3.31.

Figura 3.31 - Esquema do Piezômetro de Corda Vibrante



Fonte: FONSECA (2003)

A Tabela 3.15 apresenta o piezômetro de corda vibrante, indicando seu parâmetro de medida e destacando suas vantagens e desvantagens. CRUZ (2004) ressalta que, em barragens de usinas elétricas, o uso deste instrumento pode ser problemático devido à interferência das subestações e geradores no seu funcionamento. Contudo, esse não é um fator limitante nas barragens de rejeito, foco deste estudo.

Tabela 3.17 - Tabela Resumo Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante

Instrumento	Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante
Parâmetro Medido	Poropressões, ou seja, pressões neutras e subpressões
Vantagens	Desvantagens
• Trabalhar a volume quase constante apresentando fatores de volume extremamente reduzidos • Instrumentos que oferecem respostas praticamente instantâneas, mesmo em solos de permeabilidade muito baixo	• Dispositivos elétricos muito sensíveis a interferências eletromagnéticas de quaisquer naturezas • Sujeito a repentinas alterações de sua equação de calibração

Fonte: Fonseca (2003) e Cruz (2004)

3.4.5 **Localização dos Instrumentos**

Ao elaborar um plano de instrumentação, um dos passos mais críticos é determinar a localização dos instrumentos de forma adequada. Essa escolha deve refletir o comportamento esperado da barragem, suas características específicas e os parâmetros a serem monitorados. Segundo Silveira (2006), a locação dos instrumentos deve seguir três etapas principais:

- Identificação de áreas de risco;
- Seleção de seções transversais representativas do comportamento geral da barragem;
- Instalar em pelo menos uma seção secundária além da principal.

Além disso, Silveira (2006) também destaca a importância de instrumentar a seção de maior altura, frequentemente a mais crítica em termos de segurança estrutural. As regiões das ombreiras devem ser instrumentadas adequadamente, pois podem apresentar comportamentos diferentes, mesmo em barragens simétricas ao longo do eixo longitudinal. Além disso, a diversidade de instrumentos é essencial devido à variabilidade natural do solo e da rocha. Confiar em um único tipo de instrumento para avaliar o desempenho da barragem não é recomendável. O ideal é que a localização dos instrumentos permita a verificação cruzada das leituras, proporcionando um monitoramento mais robusto e confiável.

3.4.6 **Limitações, avanços e atuação da instrumentação**

Apesar da diversidade e modernidade dos instrumentos utilizados na monitorização de barragens, CRUZ (2003) aponta algumas limitações associadas à instrumentação, conforme listado abaixo:

- Mudança das condições do local do instrumento ao instalar
- Análise de comportamento média do maciço, sem análises de extremos de leitura
- Existência de leituras anômalas ou falsas
- São suscetíveis a danos irrepreensíveis
- É inútil sem uma análise periódica das leituras dos instrumentos

Essas limitações, no entanto, têm sido progressivamente tratadas com os avanços tecnológicos e conceituais no monitoramento de barragens. Atualmente, a instrumentação tem se beneficiado de inovações, como a automatização dos sistemas de gestão, vídeo monitoramento e o uso de drones em inspeções. A automação, em particular, não só aumenta a frequência das leituras, mas também proporciona maior confiabilidade nas decisões, limitando a coleta manual de dados a situações de conferência e manutenção.

De acordo com Silva (2019), a automação do monitoramento e da instrumentação dessas estruturas permite que a equipe técnica responsável tenha acesso a dados em tempo real. Isso torna o processo mais eficiente, proporcionando maior agilidade na interpretação dos dados e, consequentemente, maior confiabilidade nas decisões.

A Tabela 3.18 demonstra a eficácia da instrumentação, especialmente na identificação e investigação de problemas como erosão interna, cisalhamento e trincas. No entanto, é importante destacar que a instrumentação nunca deve ser a única fonte de observação. Ela deve ser complementada com um plano eficiente de inspeções visuais e outros sistemas de monitoramento, como ilustrado na tabela abaixo.

Tabela 3.18 - Principais causas de comportamento insatisfatório de barragens e sistemas de observação (CRUZ,2003/ Adaptado)

Comportamento		Causa	Sistema de Observação
Erosão Externa	Taludes e áreas de jusante	Chuva intensa	Inspeção visual **Instrumentação**
		Galgamento de ondas de montante	
		Transbordamento	Inspeção visual Batimetria
		Batimento de ondas jusantes	
		Velocidade tangencial da água de jusante	
	Talude de Montante	Batimento de ondas	
Erosão Interna		Trincas/ canalíticos Deficiência de compactação/interfaces	Inspeção visual **Instrumentação**
Cisalhamento		Deterioração da fundação ou maciço Sismos Pressões neutras Recalques diferenciais	Inspeção visual **Instrumentação** Topografia
Trincas		Ressecamento	Inspeção visual
		Ruptura hidráulica	Inspeção visual **Instrumentação**

Fonte: Adaptado de Cruz (2003)

Recentemente, o trabalho de Rana e Mishra (2023) destacou as inovações nas ferramentas geofísicas para a verificação da saúde das barragens. Eles sugerem que o uso de tecnologias avançadas pode melhorar significativamente a segurança e a

eficiência do monitoramento, integrando técnicas não destrutivas e métodos geofísicos para uma avaliação mais abrangente das condições das barragens.

3.4.7 **Custos de um plano de instrumentação de barragens**

Em projetos de engenharia, os custos elevados frequentemente atuam como fatores limitantes para a adoção de tecnologias mais avançadas, mesmo quando essas oferecem vantagens significativas. Nesse cenário, a análise dos custos associados à instalação, manutenção e monitoramento da instrumentação em barragens, especialmente nas de mineração, torna-se essencial. A literatura aponta que os custos de instrumentação representam entre 0,5% e 1,0% do custo total da construção de uma barragem (Afonso, 2004).

Em barragens de mineração, a instrumentação geralmente é implementada após a conclusão da construção, integrando-se ao plano de sondagem existente. Este arranjo permite o uso eficiente dos furos de sondagem para a instalação dos instrumentos, tornando o investimento mais racional e econômico.

Além disso, deve-se considerar os custos contínuos após a instalação, que incluem a manutenção da instrumentação e a contratação de equipes especializadas para monitoramento e interpretação dos dados. Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 1996), esses custos adicionais podem elevar a despesa total do plano de instrumentação para uma faixa entre 1% e 3% do custo total da barragem.

Portanto, a instrumentação deve ser vista não apenas como um requisito legislativo para a maioria das barragens, mas também como um investimento crucial para garantir a segurança e a gestão eficaz das estruturas. Esse investimento é essencial para a prevenção de falhas e a mitigação dos riscos associados à operação das estruturas, assegurando tanto a segurança das comunidades vizinhas quanto a proteção ambiental.

3.5 NÍVEIS DE CONTROLE EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO

CRUZ (2003) afirma que um plano de instrumentação sem a correspondente análise periódica e interpretação sistemática dos resultados é inútil, ou mesmo nocivo, na medida em que pode causar uma falsa sensação de segurança em relação ao

empreendimento. Dessa forma, as leituras fruto da instrumentação solicitam que sejam interpretados adequadamente e englobando uma avaliação da estrutura como um todo e não somente o dado presente em um único instrumento isolado, caso contrário o monitoramento da barragem será ineficaz (Velten et al, 2016).

Adicionalmente, considerando as causas de ruptura em barragens de mineração, Martin e Davies (2000) afirmam que muitos dos seus modos de falha são precedidos por sinais de alerta, os quais podem ser identificados com antecedência por meio de um programa de vigilância adequado e instrumentação. Além disso, os autores ressaltam que, caso esses sinais sejam prontamente detectados e devidamente analisados, há tempo suficiente para a implementação de medidas corretivas.

Considerando isso, esse item portanto, objetiva apresentar os conceitos do estabelecimento de valores de alerta, denominados níveis de controle, e as diferentes metodologias para sua definição.

3.5.1 **Conceituação de Níveis de Controle**

Historicamente, segundo Vasconcelos et al. (2023), desde 1980 há um crescente interesse da comunidade técnica no estabelecimento de valores limites para os dados de instrumentação de barragens. Posteriormente em 1990, as metodologias para o seu estabelecimento se disseminaram-se, de modo que termos como “valores-limite”, “níveis limite”, “faixas de tolerância” e, até mesmo “carta de risco” difundiram-se no meio técnico brasileiro como valores que, se atingidos, sinalizariam condições de alerta para a instrumentação ou a barragem. No entanto, pode ser observada divergência de padrões e critérios, e até mesmo desconhecimento, na definição destes valores.

O Boletim 158 da ICOLD – *International Commission on Large Dams* apresenta possibilidades para a definição de limites para medidas de instrumentação, níveis de controle, apoiados em modelos com base nos históricos de leituras (modelos estatísticos), em uma formalização matemática lógica das leis que regem o funcionamento da barragem (modelos determinísticos) ou integrando ambos (modelos híbridos). Os valores estabelecidos são objeto de documentos como carta de risco/carta de controle.

Os níveis de controle por sua vez determinam e informam qual a variação de leitura que os instrumentos presentes na barragem podem apresentar conforme o nível de operação estabelecido e, a partir daí, fornecer diretamente ao responsável da estrutura o nível de segurança em que a barragem se encontra (VELTEN et al., 2016).

A Resolução 95 da ANM define os níveis de controle da instrumentação da seguinte forma:

> **Níveis de controle da instrumentação:** níveis que delimitam os limites aceitáveis de auscultação para cada instrumento, ou conjunto de instrumentos, da estrutura visando subsidiar a tomada de decisão para ações preventivas e corretivas, utilizado como um dos elementos para avaliação de segurança da barragem, devendo ser definido individualmente para cada estrutura através de avaliações de segurança.

O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em seu Manual de Operação, Manutenção e Monitoramento para Instalações de Gestão de Rejeitos e Água, adaptado de Mining Association of Canada (MAC), divide e define os níveis de controle para estruturas de mineração. Nesse documento, bem como em outros documentos internacionais, utiliza-se o termo TARP (*trigger action response plan*), que significa plano de ação para resposta a gatilho. TARP é sinônimo para nível de controle, uma vez que que define níveis de gatilho para indicadores de desempenho que são baseados nos controles críticos de barragens de mineração, contudo apresenta um foco também no plano de resposta ao acionamento desse nível de controle. O que é de vital importância para o monitoramento da segurança das estruturas.

Nesse documento conjunto do IBRAM e MAC, apresenta-se exemplo de uma estrutura de quatro níveis de risco adotado pela maioria das metodologias. Esses níveis se dividem por cor, verde, amarelo, laranja e vermelho, e por gravidade como definido a seguir:

- Verde – Situação Aceitável - Nível Normal: O desempenho está alinhado com os objetivos pré-estabelecidos;
- Amarelo – Situação de Risco Menor - Nível de Atenção: Envolve a possibilidade de adoção de uma ação predefinida de gerenciamento de risco ou, alternativamente, o aumento da frequência do monitoramento e análise;
- Laranja – Situação de Risco Moderado - Nível de Alerta: Ações predefinidas de gestão de risco são implementadas. O monitoramento é intensificado para avaliar o indicador de desempenho, os critérios relacionados e a eficácia das medidas aplicadas. A combinação ou repetição de situações de risco moderado pode resultar em alto risco, exigindo a revisão dos valores-limite;

- Vermelho – Situação de Alto Risco - Nível de Emergência: Indica perda iminente ou efetiva de controle. Dependendo das consequências potenciais, medidas significativas de gestão de risco, como a interrupção das operações de processamento, podem ser adotadas, ou o Plano de Ação Emergencial pode ser acionado.

A Figura 3.32 apresenta de plano de ação para resposta a gatilho com indicadores de desempenho relacionados a controles críticos.

Figura 3.32 - Exemplo de TARPs com indicadores de desempenho relacionados a controles críticos e ações pré-definidas para diversos níveis de risco.

Indicador/ Controle	Situação Aceitável	Situação de baixo risco	Situação de Risco Moderado	Situação de Alto Risco
Instalação de rejeitos de borda livre	Nível de água estável e abaixo do nível máximo de operação	O nível de água excede o nível operacional máximo normal	O nível de água excede 50% do volume máximo de armazenamento de emergência	O nível de água excede o volume máximo de armazenamento de emergência
Comprimento da praia/orla	Dentro dos requisitos de projeto.	Comprimento mínimo da praia violado por menos de 1 semana por trimestre.	Comprimento mínimo da praia violado por menos de 1 semana por mês.	Comprimento mínimo da praia violado por mais de 2 semanas consecutivas.
Deslocamento, deslizamento ou abaulamento da crista da barragem e/ou inclinação a jusante	Nenhum visível. Resultados do monitoramento dentro dos limites do projeto e da gama de tendências históricas.	Deslocamento visível, deslizamento ou abaulamento. Os resultados do monitoramento aumentam a partir da gama de tendências históricas.	Deslocamento do pé relacionado com o deslizamento. Abaulamento de inclinação a jusante >0,5 m de altura. Os resultados do monitoramento aumentam continuamente a partir da gama de resultados históricos.	Deslocamento do pé relacionado com o corte >3 m do site original. Abaulamento de inclinação para jusante >2 m de altura.
Buraco/cratera de afundamento na crista da barragem ou na encosta a jusante	Não visível.	Visível	Diâmetro do buraco > 0,5 m de diâmetro	Diâmetro do buraco > 1 m de diâmetro.
Infiltração através da barragem	A infiltração é clara. A infiltração em locais históricos. A taxa de infiltração está dentro dos limites do projeto e do alcance das tendências históricas.	A infiltração é turva. A infiltração é uma área nova em relação ao desempenho histórico. A taxa de infiltração é mais alta do que a tendência histórica.	O mesmo que a situação anterior, mais o aumento contínuo da taxa de infiltração a partir das tendências históricas.	Acumulação ou combinação de situações de risco moderado pode levar a uma situação de alto risco e os valores limites devem ser avaliados adequadamente
Exemplos de ações pré-definidas				
	Atividades de monitoramento e frequências de acordo com o manual de OMS.	Aumento das frequências de monitoramento. • Os resultados do monitoramento devem ser imediatamente fornecidos ao EdR para revisão. • EdR para visitar o site afim de avaliar a situação. • Documentar a localização, a fotografia e a área de interesse da pesquisa. • Identificar a(s) causa(s) potencial(is). • Implementar a revisão de engenharia. • Planeje e tome as medidas necessárias de mitigação com revisão de engenharia.	Todos os itens anteriores mais: • Suspender atividades na área de preocupação. • Reavaliar limites e condições para situação de alto risco levando em consideração as condições observadas e interações de vários itens.	Todos os itens anteriores mais: • Evacuação temporária de pessoal não essencial da instalação de rejeitos. • Prepare-se para inicializar o PAE.
Pessoal Notificado				
	• Pessoa Responsável • Gerente de Planta de Processos Gerente Ambiental • EdR	Todo o pessoal da situação anterior mais: • CDI • Reguladores • Revisor(es) Independente(s) • Diretor Executivo Responsável	Todo o pessoal da situação anterior mais: • Socorristas • Pessoal de Resposta de emergência	Todo o pessoal da situação anterior.

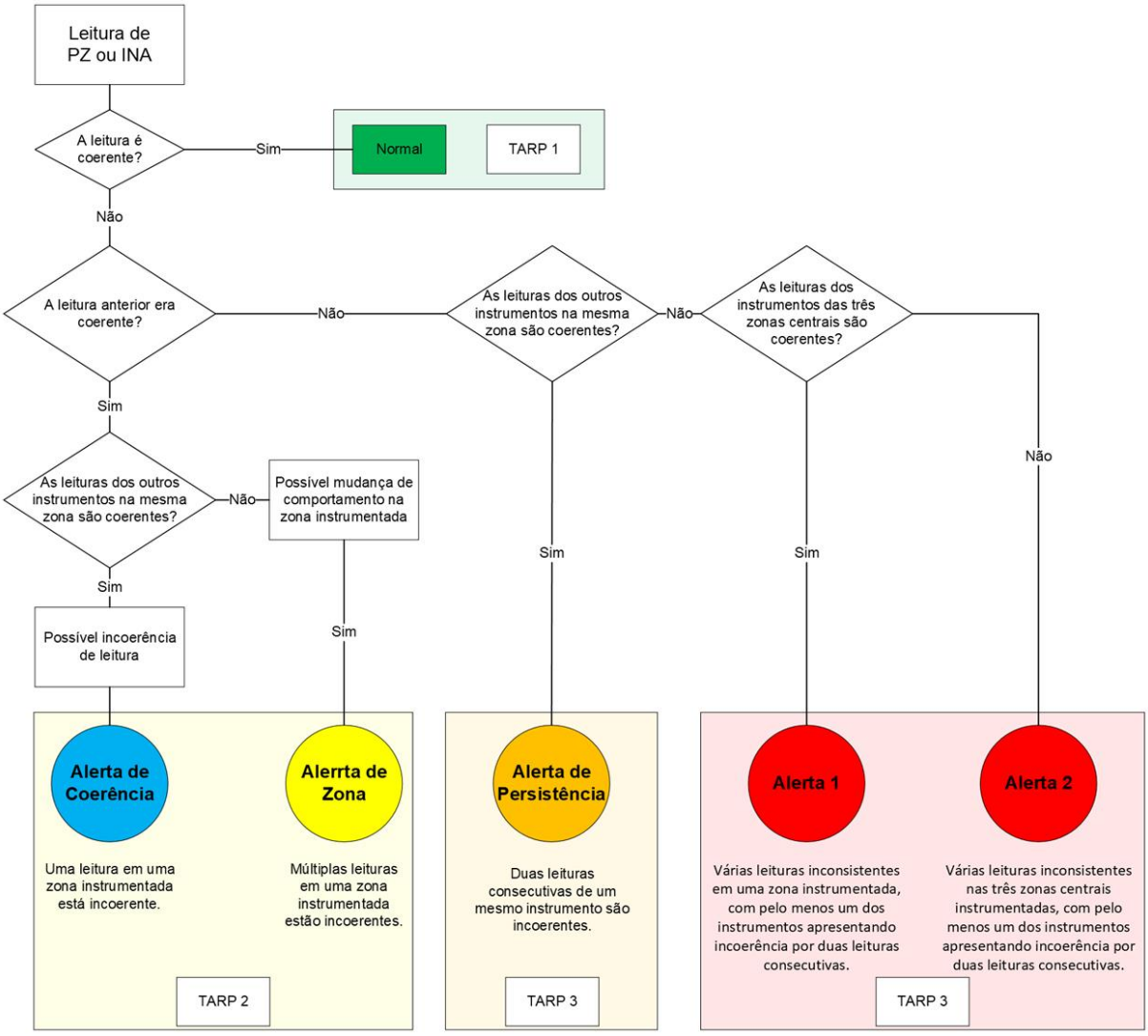
Fonte: IBRAM (2021)

3.5.2 Metodologias para determinação de Níveis de Controle

Um bom programa de vigilância de barragens, em conjunto com planos de preparação e resposta a emergências, representa uma ferramenta de gerenciamento de risco proativa e altamente econômica em relação às opções de uma falha ou um

grau de conservadorismo de projeto desnecessariamente excessivo e caro (Martin e Davies, 2000). Nesse contexto, elabora-se documento com definição de níveis de controle (TARPs), denominado de carta de controle, parte integrante do gerenciamento da segurança de toda estrutura geotécnica de mineração. A Figura 3.33 um exemplo de fluxograma para acionamento de TARPs aplicado a uma barragem de rejeito brasileira, fruto do trabalho de Nunes et al (2023).

Figura 3.33 - Fluxograma utilizado na definição dos Níveis de Alerta de Tendências e sua correlação com os TARPs



Fonte: Nunes et al (2024)

Sisson et al (2024), considerando sua importância e aplicabilidade no gerenciamento de segurança, estabelece quatro pré-requisitos para bons níveis de controle, são eles:

1. ser baseados em uma identificação completa dos modos de falha;
2. não ser tão conservadores a ponto de ocorrerem vários alarmes falsos;

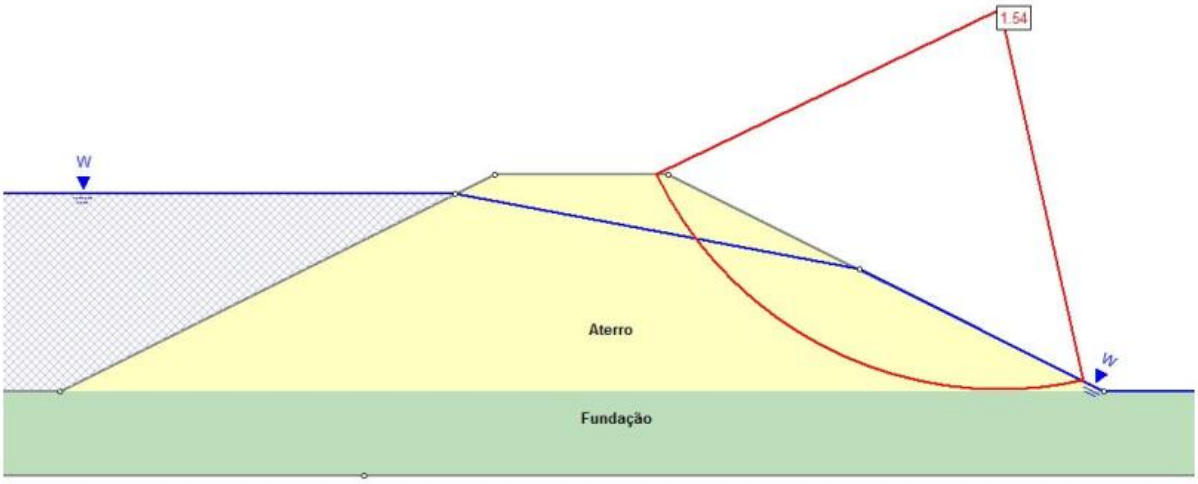
3. não ser não conservadores, resultando em comportamento adverso não detectado; e
4. identificar um caminho apropriado para escalonamento de resposta

Apesar da relevância da carta de controle para o monitoramento de barragens, não há normatização ou consenso a respeito dos critérios adotados para definição dos seus níveis de segurança (Gomes et al, 2024). Basicamente, essas análises de risco e avaliações de segurança trabalham com 4 níveis de segurança, conforme apresentado no item anterior. São eles: nível normal, nível de atenção, nível de alerta e nível de emergência. Esses níveis podem ser determinados por diferentes metodologias. No entanto, comumente, os níveis de segurança são estabelecidos a partir de análises de estabilidade por equilíbrio limite, nas quais atrelam-se os limites das faixas de risco aos fatores de segurança obtidos. Segundo VELTEN (2016), na literatura técnica especializada não existe uma metodologia consolidada para a elaboração de cartas de risco, mas em geral esses níveis de segurança são associados ao fator de segurança da barragem, da seguinte forma:

- Nível Normal: quando o FS da barragem é maior ou igual a 1,50;
- Nível de Atenção: quando o FS está acima de 1,30, mas abaixo de 1,50;
- Nível de Alerta: quando o FS está acima de 1,10, mas abaixo de 1,30; e
- Nível de Emergência: quando o FS está abaixo de 1,10.

Essa forma de análise comum, por método determinístico, leva em conta apenas a análise de estabilidade com uma linha freática inserida ou inferida manualmente. Velten (2016) argumenta que essa forma de avaliar apresenta falhas pois em função de algumas variáveis como os parâmetros de resistência adotados para os materiais que compõem a barragem e sua fundação e a forma da superfície freática, pode ocorrer do talude de jusante de uma barragem está totalmente saturado e o FS obtido na análise de estabilidade estar acima de 1,50. A Figura 3.34 mostra um exemplo de uma barragem com fator de segurança acima de 1,5 o que indica Nível Normal, porém com uma linha freática saturando todo o pé do talude. Caso esse cenário existisse em uma barragem real poderia ocorrer ruptura por erosão regressiva (*piping*), o que é incoerente com a condição normal de operação.

Figura 2.32 - Análise de estabilidade do talude de jusante da barragem com FS acima de 1,50, porém com saturação completa do talude de jusante.



Fonte: VELTEN et al. (2016)

Gomes et al. (2024) avaliou uma barragem na qual para os cenários de fatores de segurança da estabilidade por equilíbrio limite há gradientes hidráulicos abaixo dos limites admissíveis, ou seja, a pior condição não está diretamente ligada a estabilidade física do maciço mensurada por um fator de segurança. Dessa forma, a aplicação da metodologia clássica nessa estrutura atende ao modo de falha de estabilidade por equilíbrio limite em detrimento a outros modos de falha, como piping.

Dessa forma, Velten et al. (2016) propõem uma metodologia de análise de risco conjunta, na qual considera a linha freática sem tocar o talude de jusante para a definição de níveis de segurança para piezômetros e medidores de nível d'água. Não apenas analisando a estabilidade isoladamente, como também cenários de erosão interna pela análise de percolação.

Posteriormente, Sabadini et al. (2018) propôs níveis de controle de segurança, que possibilitam monitorar a elevação do nível freático em barragens, sem que haja um decrescimento significativo de fator de segurança associado. Basicamente, essa metodologia utilizada para determinar os níveis de segurança em função das oscilações do nível piezométricos no interior do maciço foi:

1. Definição da superfície freática operacional, a partir da análise de percolação do cenário I;
2. Definição da superfície freática crítica a partir de análise de percolação do cenário III, considerando a colmatação da drenagem interna (redução de até 1000 vezes da permeabilidade).

3. A partir dos itens 1 e 2 foi definido o alcance máximo da superfície freática, ou seja, a variação entre as duas por instrumento. A partir desta variação adotaram-se critérios de controle da freática dentro do maciço.
4. Com o alcance máximo as superfícies freáticas, serão estabelecidos intervalos de valores para cada um dos níveis de controle. São eles:

   Nível Normal: aquele com elevação da superfície freática inferior ao nível correspondente ao atual mais 20% da variação entre os níveis atual e crítico;

   Nível de Atenção: aqueles com elevação da superfície freática entre 20% e 40% da mesma variação;

   Nível de Alerta: São aqueles com elevação da superfície freática entre 40% e 60% da mesma variação;

   Nível de Emergência: São aqueles com elevação da superfície freática superior ou igual a 60% da mesma variação.

Apesar da existência de propostas de metodologias para o estabelecimento de níveis de controle englobando outros modos de falha, além da estabilidade por equilíbrio limite, não há um respaldo normativo. Gomes et al. (2024), conclui que uma vez que não há procedimento normativo, fica a critério do projetista e, por consequência, condicionado à sua expertise, este nível de discussão nos projetos.

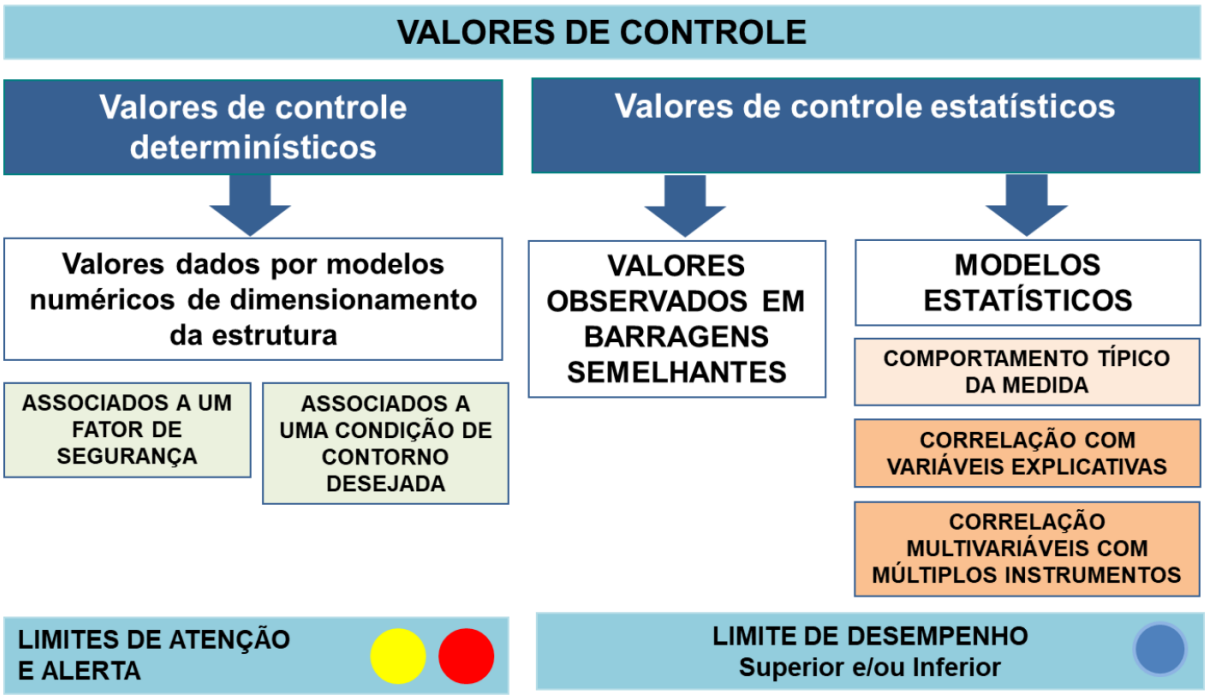
O estabelecimento de níveis de controle por modelo determinístico, visto anteriormente, possui vantagens tais como: ser o único modelo que permite obter valores de referência indispensáveis para o controle de segurança durante o primeiro enchimento do reservatório, fase mais crítica da vida útil de barragem de contenção de água. No entanto, os modelos numéricos possuem limitações, bem como há incertezas e variabilidades nas propriedades dos materiais (concreto, solo, rocha) e, em especial, nas características das fundações. Além disso, a modelagem numérica pode não ser simples e levar a resultados muito distantes das grandezas efetivamente medidas pela instrumentação

Apresentando uma metodologia alternativa às cartas de risco, Fusaro (2007) e Marinaro (2022) consideram a utilização dos dados históricos das leituras dos instrumentos para definição de níveis de controle por métodos estatísticos. A aplicação de métodos estatísticos por sua vez está limitada a existência de um número suficiente de observações, tomadas em uma gama suficientemente variada de “grandezas-causa" (diferentes níveis de montante, por exemplo). Além disso, a depender da metodologia estatística adotada, é necessário que o banco de dados

atenda a determinados critérios para que a formulação estatística seja aplicada com assertividade.

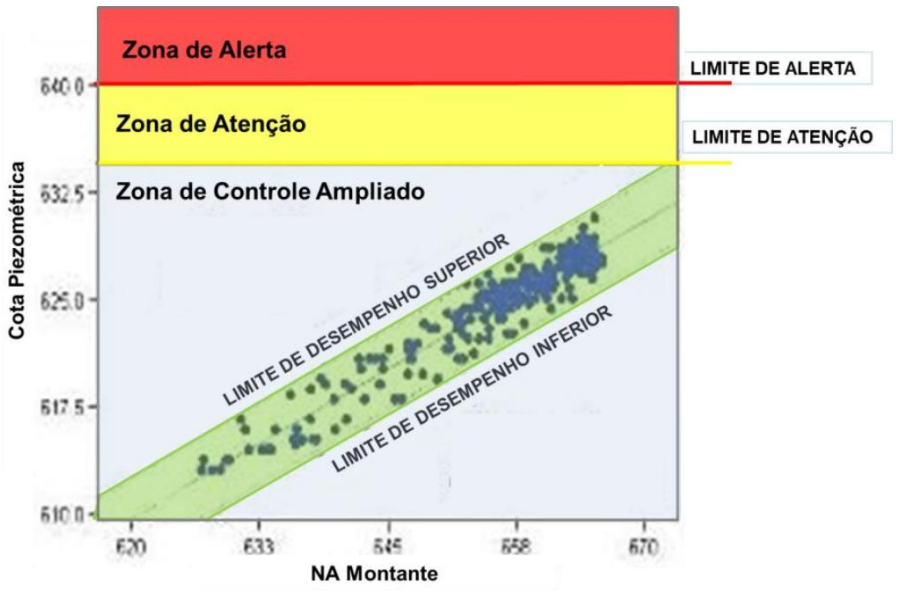
Existe ainda a possibilidade de integração dos valores de controle obtidos a partir dos métodos determinísticos e estáticos. A Figura 3.34 apresenta a proposta de Vasconcellos et al. (2023), na qual os critérios determinísticos são utilizados para níveis associados à segurança global da estrutura através da diminuição do fator de segurança ou condição de contorno desejada. Enquanto os métodos estatísticos estão associados ao comportamento esperado de cada instrumento, considerando limite de desempenho para cada instrumento de acordo com seu histórico de leitura. A Figura 3.35 apresenta um exemplo, extraído do mesmo trabalho de Vasconcellos et al. (2023), da aplicação dessa metodologia em dado de leitura de piezômetro.

Figura 3.34 - Proposta de nomenclatura para valores de controle para instrumentação de barragens utilizado métodos determinísticos e estatísticos.



Fonte: VASCONCELLOS et al (2023)

Figura 3.35 - Zonas delimitadas pelos valores de controle da instrumentação considerando método integrado, determinístico e estatístico, para estabelecimento de níveis de controle.

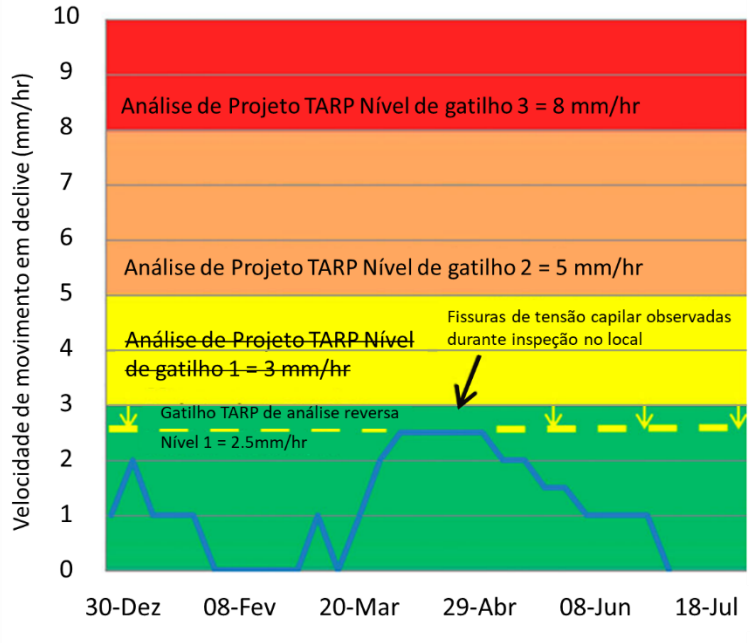


Fonte: VASCONCELLOS et al (2023)

O recente trabalho de Sun et al (2024) também integra metodologia determinística e estatística. No qual utiliza, a análise determinística para identificar condições aceitáveis dos instrumentos geotécnicos com base nas condições específicas do local, enquanto a análise estatística rastreia as leituras dos instrumentos ao longo do tempo para detectar anomalias e tendências. Nesse trabalho, para regiões em que as análises de estabilidade com variação da freática resultaram fatores de segurança acima do estabelecido em critério de projeto, 1,5, foi considerado a leitura máxima histórica como gatilho de nível de alerta.

O aperfeiçoamento dos níveis de controle, entretanto, transcendem o aspecto teórico e deve ser coerente com as observações visual de campo. O trabalho de Clarkson (2020), por exemplo, apresenta um caso em que os níveis de controle, denominados de TARP, são ajustados à medida que é perceptível em campo uma deterioração do talude a uma velocidade de movimento menor do que a estabelecido para TARP 1 (equivalente a nível de atenção). Dessa forma, aplicou-se uma abordagem conservadora, mais razoável, em que o valor de TARP 1 diminui para corresponder ao valor de velocidade em que foram observados sinais de deterioração, conforme Figura 3.36. Esse exemplo, reforça o entendimento da necessidade de integração entre os conteúdos da instrumentação e percepções visuais de campo para um sistema de monitoramento integrado e assertivo. De modo que a avaliação dos níveis de controle não deve ser considerada de forma isolada.

Figura 3.36 - Retroanálise de níveis de controle com base em observação visual



Fonte: Clarkson (2020)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA BARRAGEM DE ESTUDO

Este item apresenta as características da barragem analisada, incluindo as seções geológico-geotécnicas avaliadas e os principais aspectos do projeto.

4.1.1 **Características gerais da barragem**

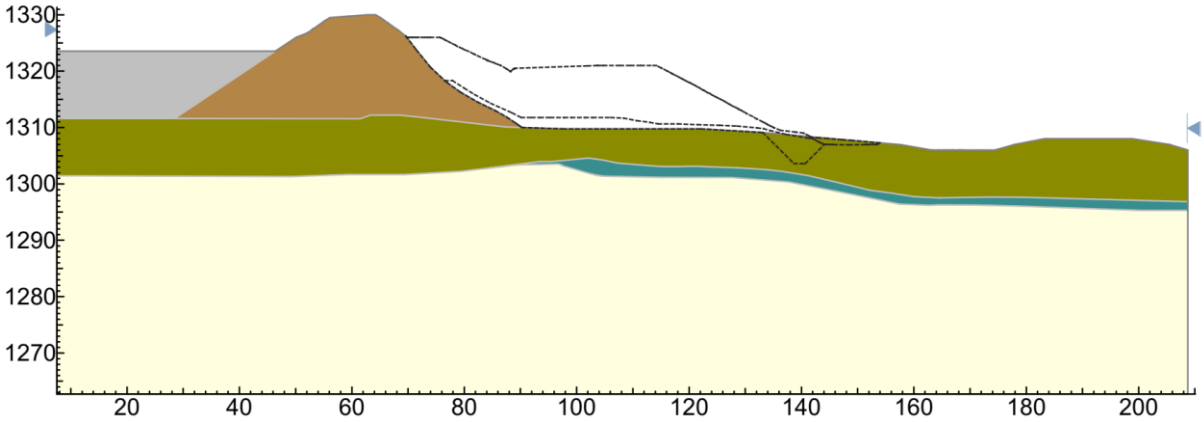
A barragem utilizada na dissertação, doravante denominada de “Barragem Estudo”, é uma barragem de mineração construída com finalidade de conter sedimentos provenientes de uma pilha de estéril localizada a montante do barramento. A Figura 4.1 apresenta uma vista aérea da estrutura e suas curvas topográficas, em que é possível ver não só o barramento, como também parte do seu reservatório e sua estrutura vertente. Nota-se que a estrutura foi implantada em um vale encaixado.

Figura 4.1 - Localização da Barragem Estudo com curvas topográficas

Fonte: Dados disponibilizados (2025)

A Barragem Estudo iniciou sua operação em 1985. Essa estrutura foi construída com aproximadamente 280,0 m de comprimento de crista, uma média de 9,6 m de largura de crista na região central, altura de 20,0 m e coroamento na elevação 1.328,0 m. O talude de jusante foi construído com inclinação de 1V:1,4H, sem bermas intermediárias. Inicialmente a estrutura era constituída de seção homogênea de terra sem drenagem interna, conforme Figura 4.2.

Figura 4.2 - Maciço Inicial

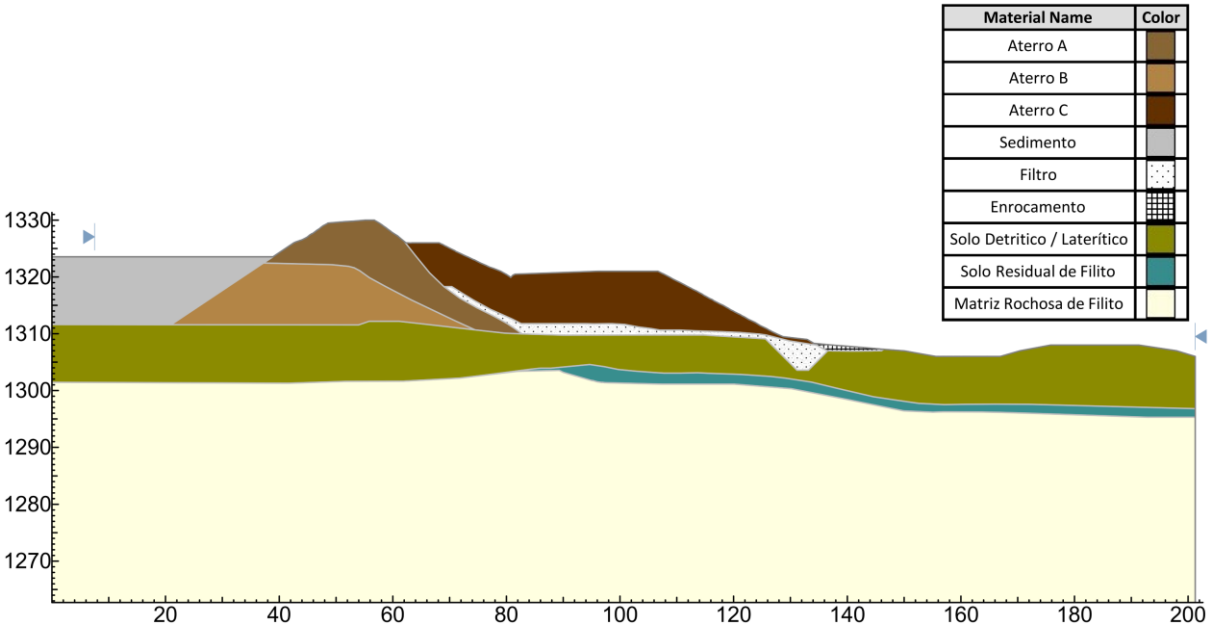


Fonte: Autor (2025)

Posteriormente, no ao de 2009, foram executadas interversões na estrutura, de modo que foram realizados cortes nos taludes laterais e a construção de uma berma de equilíbrio, com largura de aproximadamente 35 m, para melhorar a condição de estabilidade. Além disso, foi executado um tapete drenante com espessura de 0,75 m abaixo da berma. Na região central da estrutura foi executado outra berma de cerca de 5 metros de altura, acima da berma anterior.

A Figura 4.3 apresenta a seção central da Barragem Estudo atual, observa-se que, diante de dados de prospecção geotécnica posteriores, o Maciço Inicial passou a ser tradado como dois materiais distintos, Aterro A e Aterro B. Dessa forma, o aterro da barragem é considerado heterogêneo, sendo zoneado três tipos de materiais: aterro de minério de ferro (A), aterro de quartzito (B) e aterro de reforço (C).

Figura 4.3 - Seção Central Atual



Fonte: Autor (2025)

Essa estrutura apresenta atualmente altura de 24,0 m, conforme Lei Federal 14.066 de 30 de setembro de 2020, e extensão de crista de crista de 280 m. A Tabela 4.1 apresenta um compilado das principais características técnicas da estrutura.

Tabela 4.1 - Principais Características Técnicas

Tipo de Seção:	Mista/Heterogênea
Tipo de Barragem:	Solo Compactado / Barragem de Terra
Altura (m):	24,00
Comprimento de Crista (m):	280,00
Volume de Reservatório (m^3)	2.713.398.69

4.1.2 **Seções Geológico-Geotécnicas**

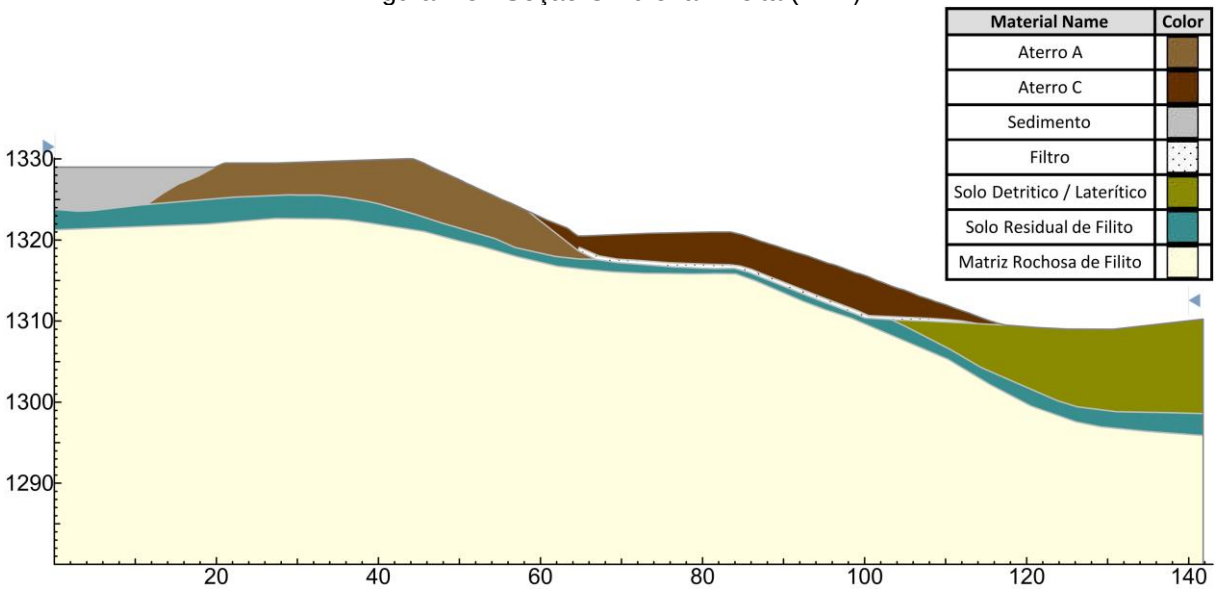
A Barragem Estudo possui três seções geológico-geotécnica, sendo elas: seção ombreira esquerda, seção central e seção ombreira direita. A Figura 4.4 apresenta a locação dessas seções.

Figura 4.4 - Vista aérea da Barragem Estudo com locação de seções

Fonte: Autor (2025)

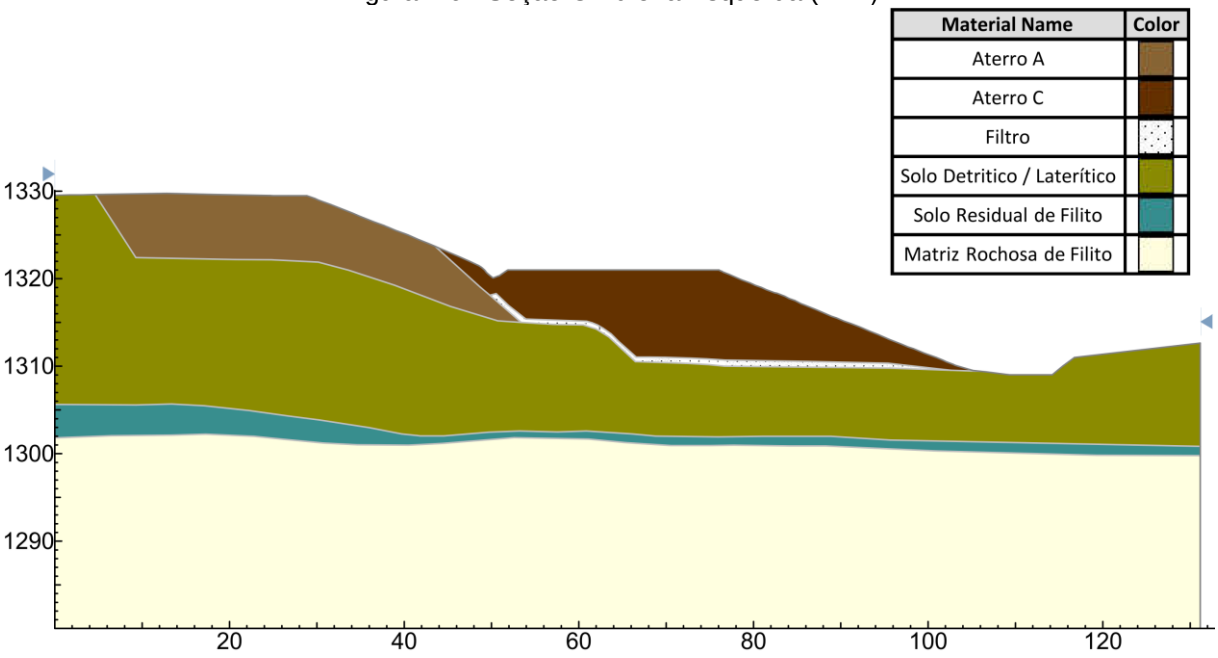
A Figura 4.5 e a Figura 4.6, apresentam a seção da ombreira direita e seção da ombreira esquerda, respectivamente. Enquanto a Figura 4.3, apresentada anteriormente, mostra a seção central. Nelas é possível observar tanto as características geológicas da fundação, classificação dos materiais da estrutura, como também as noções das suas medidas geométricas.

Figura 4.5 - Seção Ombreira Direita (D-D')



Fonte: Autor (2025)

Figura 4.6 - Seção Ombreira Esquerda (E-E')



Fonte: Autor (2025)

4.2 CARACTERIZAÇÃO E PARÂMETROS DOS MATERIAIS

Os parâmetros de resistência e permeabilidade empregados nos modelos de estabilidade e percolação são apresentados na Tabela 4.2. No decorrer deste subitem serão apresentadas as características dos materiais.

Tabela 4.2 - Resumo dos parâmetros de resistência adotados

Cor	Material	γ (kN/m³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k (m/s)
	Aterro A	27	18	30	$2{,}61 \times 10^{-6}$
	Aterro B	19	15	30	$6{,}35 \times 10^{-7}$
	Aterro C	27	10	35	$2{,}11 \times 10^{-6}$
	Matriz Rochosa de Filito	22	60	35	$4{,}95 \times 10^{-7}$
	Filtro	21	0	35	4×10^{-4}
	Enrocamento	23	0	40	1
	Sedimento	18	5	20	1×10^{-3}
	Solo Detritico / Laterítico	16	10	29	$8{,}06 \times 10^{-6}$
	Solo Residual de Filito	20	20	28	$2{,}60 \times 10^{-6}$

Fonte: Autor (2025)

Os dados apresentados na tabela acima provêm de campanhas de investigação geológica-geotécnica realizadas na estrutura, nos anos de 2007 (antes da intervenção), 2014, 2016 e 2022. Considerando o número total de sondagens, foram executadas 34 sondagens mistas, 22 sondagens de percussão e 1 sondagem rotativa. A Figura 4.7 mostra a localização das sondagens realizadas, evidenciando que a prospecção geotécnica não se restringiu ao corpo da barragem, mas incluiu também áreas como a região de acesso (SM-15) e a área próxima ao vertedor (SM-33).

Para a camada de sedimento, filtro e enrocamento, materiais que não possuíam dados de ensaios geotécnicos disponíveis, foram utilizados dados de projeto, os quais foram validados com estudos de caso realizados em barragens de mineração, como os de Gomes (2024) e Marinaro (2022).

Figura 4.7 - Mapa de Locação de Sondagens realizadas

Fonte: Autor (2025)

Conjuntamente com os ensaios de campo, foram realizados, nas respectivas campanhas, ensaios de laboratório com o objetivo de caracterizar principalmente o aterro da barragem e a fundação. Os ensaios realizados, conforme o acervo de dados disponível, incluem: granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos sólidos, massa específica natural, adensamento, ensaios triaxiais adensados não drenados (CIU) e ensaio de permeabilidade.

Este subitem tem como objetivo apresentar um resumo dos principais resultados dos ensaios e consolidar os parâmetros geotécnicos de cada unidade de solo/rocha identificada na Barragem Estudo, a saber: aterro A, aterro B, aterro C, filtro, solo detrítico/laterítico, solo residual de filito e matriz rochosa de filito.

4.2.1 **Parâmetros de Resistência**

4.2.1.1 Aterro de Minério de Ferro – Aterro A

O Aterro A é composto por solo siltoso e arenoso, com baixo teor de argila e presença de pedregulhos de canga e raízes. A coloração é marrom avermelhada, com aproximadamente 49% de areia, 26% de silte e 28% a 32% de pedregulho. Classificado como não plástico, o material apresenta os seguintes resultados de ensaios triaxiais:

- Peso específico = 27 kN/m³;
- Intercepto de coesão: 18 kPa;
- Ângulo de atrito efetivo: Φ’ = 30°.

Os índices de NSPT variaram de 14 a 50 golpes, indicando um material com grau de compactação médio a alto, sendo os valores mais altos atribuídos à presença de pedregulhos.

4.2.1.2 Aterro de Quartzito – Aterro B

Composto por areia muito fina a média, compacta, quartzosa com sericita e fragmentos de quartzito sericítico. Possui cor amarelo claro esbranquiçado, e a plasticidade varia de nula a muito baixa. Os valores de NSPT variam de 9 a 22 golpes, indicando um grau de compactação médio a alto. A permeabilidade é de 10^{-5} cm/s. O material é um solo residual de filito, com maior presença de argila. Ensaios triaxiais apresentaram os seguintes resultados:

- Peso específico = 19 kN/m³;
- Intercepto de coesão: 15 kPa;
- Ângulo de atrito efetivo: Φ’ = 30°.

4.2.1.3 Aterro Da Berma – Aterro C

Composto por material silto-arenoso, compacto a medianamente compacto, com pedregulhos ferruginosos e coloração marrom avermelhada. Os índices NSPT variam de 10 a 50 golpes. Parâmetros adotados, conforme ensaio triaxial:

- Peso específico = 27 kN/m³;
- Intercepto de coesão: 10 kPa;
- Ângulo de atrito efetivo: Φ’ = 35°.

4.2.1.4 Sistema de Drenagem Interna – Filtro

O sistema de drenagem interna da barragem consiste em um filtro inclinado de areia no contato entre o reforço e o maciço inicial, conectado a um tapete drenante assentado sobre a fundação da berma de reforço e conectado a trincheiras drenantes.

Os parâmetros adotados para o sistema de drenagem são:

- Peso específico = 21 kN/m³;
- Intercepto de coesão: 0 kPa;
- Ângulo de atrito efetivo: Φ’ = 35°.

4.2.1.5 Solo Detrítico / Laterítico

Solo heterogêneo, com espessuras variando de 2,0 m a 17,0 m na barragem, podendo superar 30,0 m a jusante. é composto por argila arenosa rija, silte argiloso a arenoso, compacto a muito compacto, com pedregulhos quartzosos e ferruginosos, e fragmentos de canga, de coloração marrom avermelhada. O solo laterítico apresenta concreções ferruginosas, consistência muito compacta, baixa recuperação nas perfurações, e fragmenta-se facilmente. A matriz é siltosa a argila arenosa, com cascalho mal selecionado. A classificação de Atterberg indica uma argila de baixa compressibilidade. Parâmetros adotados para o solo:

- Peso específico = 18 kN/m³;
- Intercepto de coesão: 10 kPa;
- Ângulo de atrito efetivo: Φ’ = 29°.

4.2.1.6 Solo Residual de Filito

Identificado na ombreira direita e a jusante da barragem, é composto por silte arenoso a argiloso, de coloração cinza a marrom-bege. A resistência à penetração variou entre 6 e 64 golpes.

4.2.1.7 Matriz Rochosa de Filito

Localiza-se abaixo do solo residual, sendo composta por filito acinzentado, alterado a medianamente alterado, pouco a medianamente consistente, e medianamente a muito fraturado. Em sondagens mais profundas, o filito pouco alterado foi encontrado. As descontinuidades observadas são subverticais a inclinadas, com paredes oxidadas e lisas a rugosas. A investigação de campo mostrou variação nos valores de N_{SPT}, entre 16 e 70 golpes, com a maior parte das sondagens não apresentando valores no material.

4.2.2 **Parâmetros de Permeabilidade**

Parte das sondagens realizadas na Barragem Estudo incluíram ensaios de infiltração, que por sua vez possuem o objetivo de avaliar a condutividade hidráulica dos materiais da fundação e aterro. Com exceção do filtro e sedimentos, todos os materiais foram contemplados por esses ensaios. A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos valores obtidos pelos ensaios, acrescidos dos valores adotados para filtro e sedimentos.

Tabela 4.3 - Resumo dos resultados de condutividade Hidráulica dos Materiais

Materiais	Nº de resultados	Permeabilidade (m/s)			Desvio Padrão
		Média	Máximo	Mínimo	
Aterro A	24	2,61E-06	4,10E-05	3,48E-09	8,14E-06
Aterro B	5	6,35E-07	1,87E-06	5,76E-08	6,49E-07
Aterro C	19	2,11E-06	2,02E-05	1,27E-08	4,44E-06
Solo Detritico / Laterítico	23	8,06E-06	1,02E-04	1,04E-08	1,88E-05
Solo Residual de Filito	3	2,60E-06	7,57E-06	2,75E-08	3,51E-06
Matriz Rochosa de Filito	10	4,95E-07	9,11E-07	3,34E-08	3,04E-07

Fonte: Autor (2025)

Para o maciço inicial ferruginoso (Aterro A), os coeficientes de permeabilidade obtidos variaram entre 10^{-5} e 10^{-9} m/s. Ensaios de caracterização indicaram que o aterro é composto de areia siltosa marrom escuro com pedregulho, material cuja permeabilidade média representativa é de 2,61 x 10^{-6} m/s.

No caso da porção quartzosa do maciço inicial (Aterro B), os valores de permeabilidade oscilaram entre 10^{-6} e 10^{-8} m/s, correspondendo predominantemente a uma areia muito fina, compatível com o valor médio adotado de 6,35 x 10^{-7} m/s.

Para a berma de reforço (Aterro C), foram obtidos coeficientes de permeabilidade que variam entre 10^{-5} e 10^{-8} m/s. O material utilizado nessa berma, descrito como areia argilosa, apresentou um valor médio de permeabilidade adotado de 2,1 x 10^{-6} m/s.

De acordo com a análise granulométrica, o solo detrítico-laterítico, que é composto por material areno-siltoso marrom escuro com pedregulhos, demonstrou compatibilidade com a permeabilidade utilizada no modelo. Os coeficientes de permeabilidade desse material variaram entre 10^{-4} e 10^{-8} m/s. Diante da variabilidade dos coeficientes, decidiu-se inicialmente pela adoção do valor médio de 8,06 x 10^{-6} m/s, sujeito a ajustes conforme a validação da superfície freática observada na instrumentação.

4.3 SISTEMA DE AUSCULTAÇÃO E DADOS DE MONITORAMENTO

4.3.1 **Locação dos Instrumentos**

O maciço e a fundação da Barragem Estudo são monitorados atualmente por 10 indicadores de nível de água (NA), 12 piezômetros (PZ) e 21 prismas (PR). No reservatório existe uma régua de reservatório (RR) e, no pé da barragem existe um medidor de vazão com régua limnimétrica e sensor ultrassônico (MV). A Tabela 4.4 apresenta os dados gerais da instrumentação operante na barragem, enquanto a Figura 4.8 apresenta a locação em planta dos instrumentos.

Tabela 4.4 - Informações gerais dos instrumentos de monitoramento

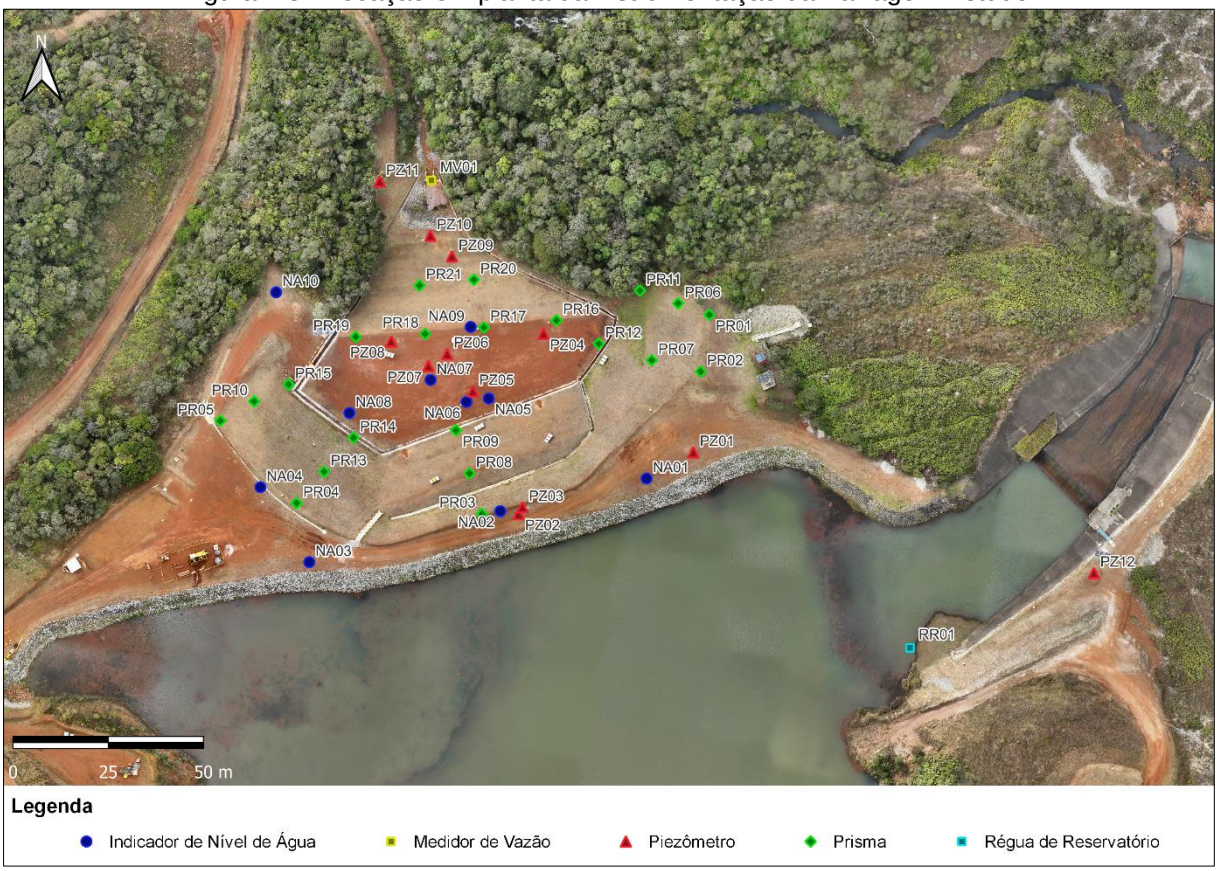
ID Campo/ Descrição	Tipo de Instrumento	Manual/ Automático	Intervalo de Leituras	Locação da Instrumentação	Inst.[1]	Prof. (m)
RR01	Régua de Reservatório	Automático	4 horas	Reservatório	-	-
NA01	Medidor de Nível de Água	Manual	15 dias	Crista do talude	Aterro	22,6
NA02	Medidor de Nível de Água	Automático	4 horas	Crista do talude	Aterro	19,99

ID Campo/ Descrição	Tipo de Instrumento	Manual/ Automático	Intervalo de Leituras	Locação da Instrumentação	Inst.[1]	Prof. (m)
NA03	Medidor de Nível de Água	Manual	15 dias	Crista do talude	Aterro	35,81
NA04	Medidor de Nível de Água	Manual	15 dias	Crista do talude	Aterro	30,67
NA05	Medidor de Nível de Água	Manual	15 dias	Berma de reforço	Aterro	8,24
NA06	Medidor de Nível de Água	Automático	4 horas	Berma de reforço	Aterro	30,63
NA07	Medidor de Nível de Água	Automático	4 horas	Berma de reforço	Aterro	28,75
NA08	Medidor de Nível de Água	Automático	4 horas	Berma de reforço	Aterro	22,64
NA09	Medidor de Nível de Água	Manual	15 dias	Berma de reforço	Aterro	12,21
NA10	Medidor de Nível de Água	Manual	15 dias	Ombreira esquerda	Aterro	18,86
PZ01	Piezômetro	Manual	15 dias	Crista do talude	Fundação	12,1
PZ02	Piezômetro	Manual	15 dias	Crista do talude	Fundação	15,05
PZ03	Piezômetro	Manual	15 dias	Crista do talude	Aterro	27,05
PZ04	Piezômetro	Manual	15 dias	Berma de reforço	Aterro	4,9
PZ05	Piezômetro	Manual	15 dias	Berma de reforço	Aterro	6,9
PZ06	Piezômetro	Manual	15 dias	Berma de reforço	Aterro	11
PZ07	Piezômetro	Manual	15 dias	Berma de reforço	Fundação	15
PZ08	Piezômetro	Manual	15 dias	Berma de reforço	Aterro	22,89
PZ09	Piezômetro	Automático	4 horas	Pé do talude	Fundação	8,29
PZ10	Piezômetro	Manual	15 dias	Pé do talude	Fundação	7,8
PZ11	Piezômetro	Manual	15 dias	Pé do talude	Fundação	10,35
PZ12	Piezômetro	Manual	15 dias	Extravasor	Extravasor	8,15
MV01	Medidor de Vazão	Automático	4 horas	Pé do talude	-	-
PR01	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR02	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR03	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR04	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR05	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR06	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR07	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR08	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR09	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR10	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR11	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR12	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR13	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR14	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR15	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR16	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR17	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR18	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR19	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR20	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-
PR21	Prisma	Automático	10 minutos	-	-	-

(1) Material em que a célula drenante do instrumento foi instalado. Observa-se que como o indicador de nível d'água apresenta área drenante em toda profundidade, entende-se que dessa forma o instrumento monitora o aterro da estrutura.

Fonte: Autor (2025)

Figura 4.8 - Locação em planta da instrumentação da Barragem Estudo



Fonte: Autor (2025)

Conforme apresentado na Tabela 4.4, o sistema de auscultação conta com leituras automáticas de 4 indicadores de nível de água, 1 piezômetro, 1 régua de reservatório, 1 medidor de vazão e todos os prismas. Comenta-se a respeito das leituras dos instrumentos, em relação a sua condição manual ou automática, a seguir:

- Leitura manual: Para instrumentos com leitura manual, a coleta ocorre quinzenalmente. No caso de indicadores de nível de água e piezômetros, mede-se a profundidade do nível de água em relação ao topo do instrumento. A partir desse valor de leitura manual, subtrai-se da cota de topo adotada do instrumento, conforme eq. (12). Para o caso da régua do reservatório, soma-se o valor de leitura manual da régua a cota base, conforme eq. (13). Por fim, no caso do medidor de vazão, aplica-se a fórmula do vertedor triangular apresentada na eq. (14).

PZ e INA: $$[elevação\ de\ leit.(m)] = [cota\ de\ topo(m)] - [leit.manual(m)] \quad (12)$$

RR: $$[elevação\ de\ leit.(m)] = [leit.manual(m)] + [cota\ base(m)] \quad (13)$$

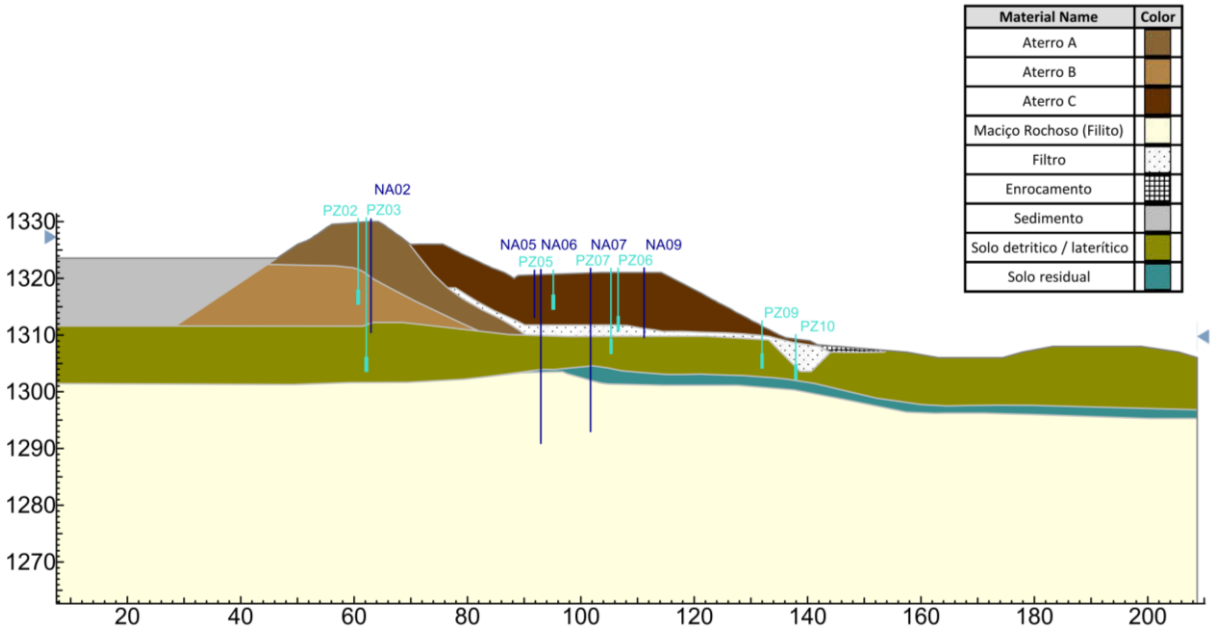
MV: $$[vazão(L/s)] = 1{,}32x[leit.manual(m)]^{2{,}47}x1000 \quad (14)$$

- Leitura automática: Nesse caso não há necessidade da visita do técnico em campo, o instrumento, a partir de uma equação inerente, calcula a

elevação das leituras. Observa-se que essa equação está sujeita e calibração e pode ser validada em relação a leitura manual conforme necessidade.

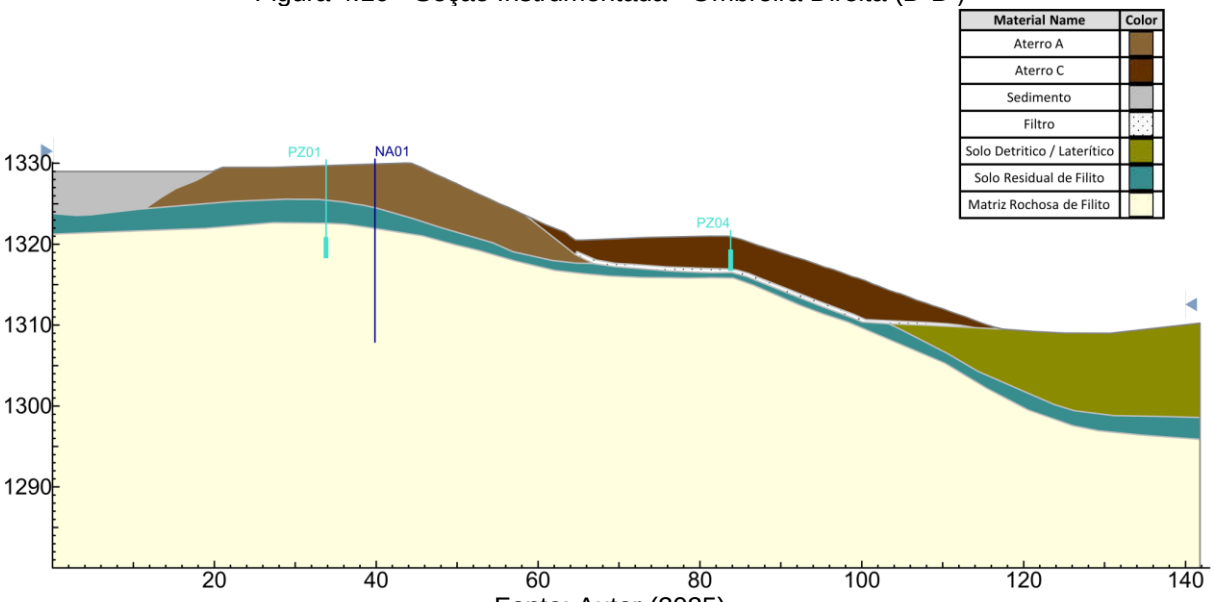
A Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11 apresentam as seções geológico-geotécnicas da Barragem Estudo com a locação dos indicadores de nível de água e piezômetros. Observa-se que alguns instrumentos não são contemplados com locação em seção geotécnica devido a sua posição, são eles: NA03, NA10, PZ11 e PZ12

Figura 4.9 - Seção Instrumentada – Central (C-C')



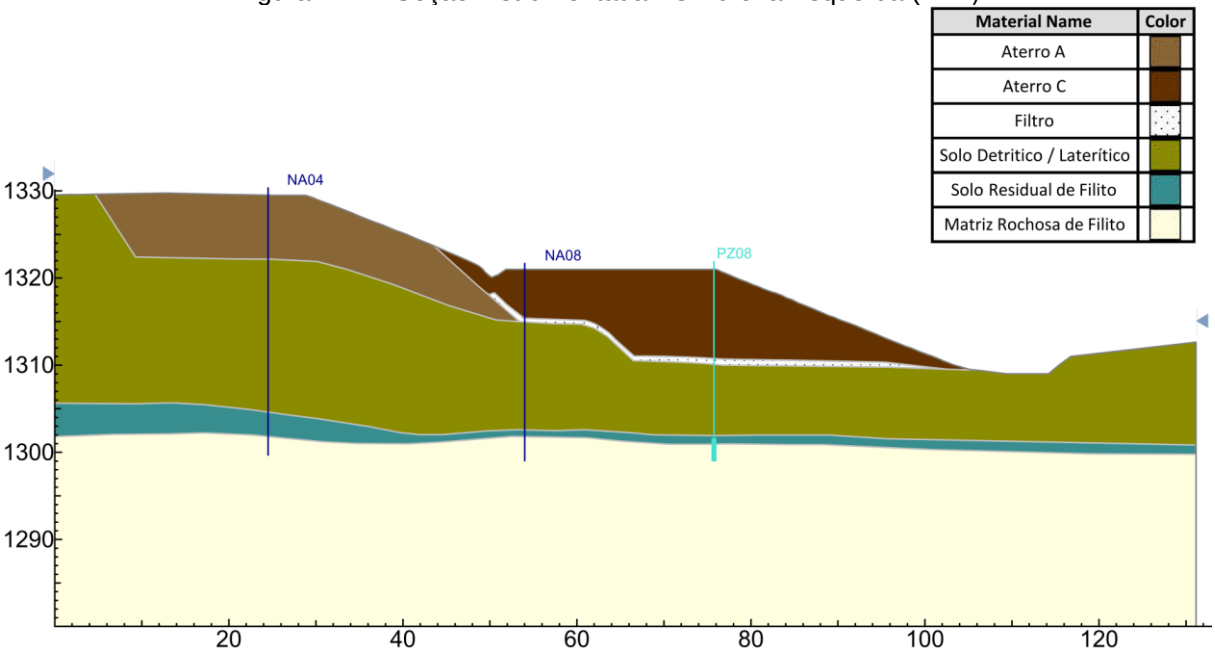
Fonte: Autor (2025)

Figura 4.10 - Seção Instrumentada - Ombreira Direita (D-D')



Fonte: Autor (2025)

Figura 4.11 - Seção Instrumentada - Ombreira Esquerda (E-E')



Fonte: Autor (2025)

Para a dissertação foram disponibilizados os dados de leitura dos instrumentos relacionados ao controle de percolação e nível piezométrico e freático. Ou seja, dados da régua do reservatório, indicadores de nível de água, piezômetros e medidor de vazão. Uma vez que os instrumentos foram instalados em diferentes datas, o período histórico de leitura dos instrumentos é distinto. Contudo, a partir de uma análise crítica dos dados e considerando a incidência de erros de leituras em registros antigos, optou-se por utilizar dados a partir do ano de 2020.

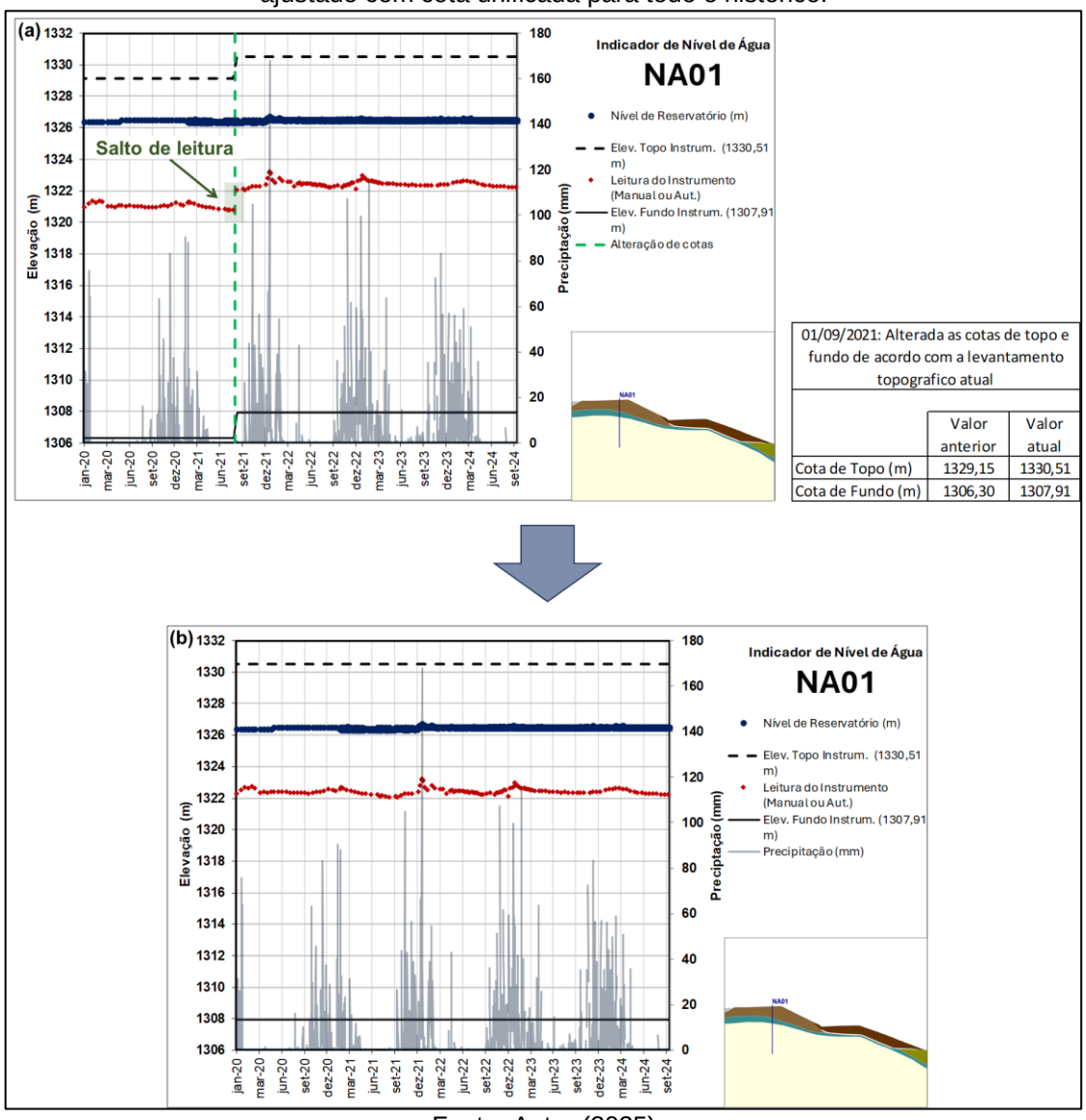
4.3.2 **Compatibilização das leituras**

Durante o processo de monitoramento, é comum haver atualizações de levantamentos topográficos. Essas atualizações, por sua vez, resultam em modificações de valores adotados para cotas de topo e fundo dos instrumentos, o que interfere diretamente em seus valores de leitura. Contudo, para utilização das médias piezométricas históricas dos piezômetros em seções de interesse, é necessário que todas as leituras dos instrumentos sejam comparadas a partir de uma mesma base. Fazendo-se necessário um processo de compatibilização.

Considerando inicialmente o instrumento manual NA01, a Figura 4.12(a) apresenta um possível salto de leitura acima de 1 metro. Contudo, a parte dos dados de atualização cadastral, conclui-se que esse salto é devido a atualização da cota de

topo conforme levantamento topográfico mais recente. Dessa forma, para compatibilização das leituras anteriores ao levantamento, com as leituras posteriores, adotou-se a mesma cota de topo e fundo para todo o histórico. Resultando no gráfico apresentado na Figura 4.12(b). Esse processo foi aplicado a todos os instrumentos manuais que passaram por atualização topográfica.

Figura 4.12 - (a) Leituras do instrumento NA01 com salto devido à atualização topográfica; (b) Gráfico ajustado com cota unificada para todo o histórico.



Fonte: Autor (2025)

Para o caso dos instrumentos automáticos, apesar que suas elevações de leitura são informadas diretamente, essas leituras são resultantes da equação do sensor dos instrumentos. Foi constatado que todos os instrumentos automáticos passaram por correção da equação de calibração, essa tratativa foi aplicada de forma retroativa a partir de setembro de 2021, em diferentes datas, e resultou em um salto

de leitura positivo ou negativo a depender do instrumento. Foi constatado que as diferenças de leitura resultante da calibração dos instrumentos estão relacionadas com a atualização topográfica, uma vez que o valor da diferença de leitura é aproximadamente igual ao valor da diferença de cotas. A Tabela 4.5 apresenta um comparativo diferenças de leituras e cotas.

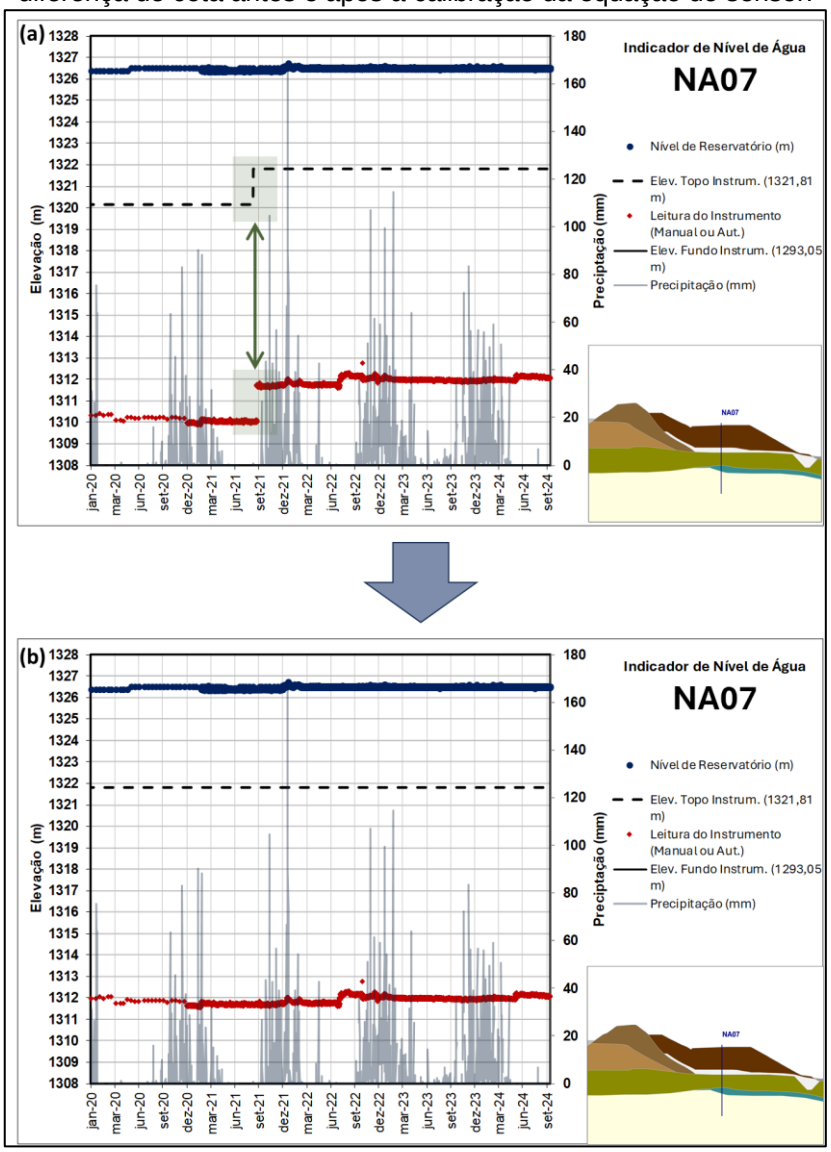
Tabela 4.5 - Comparativo entre diferenças de leituras em relação a calibração e cotas de topo em relação a atualização topográfica para instrumentos automáticos

Inst.	Leitura do dia 11/01/2022 (m)			Cota de Topo (m)		
	Atual	Anterior	Dif.	Atual	Anterior	Dif.
PZ09	1.309,12	1308,78	0,34	1.312,52	1.312,22	0,30
NA02	1.319,51	1.319,74	-0,23	1.330,51	1.330,74	-0,23
NA06	1.314,58	1.314,00	0,58	1.321,60	1.321,08	0,52
NA08	1.318,02	1.317,22	0,80	1.321,68	1.320,87	0,81
NA07	1.311,99	1.310,33	1,66	1.321,81	1.320,15	1,66

Fonte: Autor (2025)

Dessa forma, para as leituras disponibilizadas anteriores a calibração da equação do sensor, foram acrescidas a diferença de cota, a fim de compatibilizar essas leituras com o novo levantamento. De forma exemplificativa, a Figura 4.13 apresenta esse processo compatibilização de leituras aplicado ao NA07.

Figura 4.13 - Processo de compatibilização de leituras para o instrumento NA07, considerando a diferença de cota antes e após a calibração da equação do sensor.



Fonte: Autor (2025)

4.4 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO

A Tabela 4.6 sintetiza as leituras dos indicadores de nível d'água, dos piezômetros e da régua do reservatório, apresentando os valores de leitura média, o valor máximo e o valor mínimo histórico para cada instrumento. De forma análoga, a Tabela 4.7 compila esses mesmos dados para o medidor de vazão, permitindo uma análise detalhada e comparativa dos parâmetros monitorados.

Tabela 4.6 - Resumo das leituras da régua do reservatorio, indicadores de nível de água e piezometros

Código	Seção	Instrumento	Local de Instalação	Período de Análise (ano)	Nº de Leituras	El. Med. (m)	El. Máx. (m)	El. Mín. (m)	Oscilação (m)	Observações
RR01	-	RR	RESERVATÓRIO	4,7	7553	1326,49	1326,70	1326,42	0,28	
NA01	D-D’	INA	FUNDAÇÃO	4,7	139	1322,45	1323,23	1322,08	1,15	
NA02	C-C’	INA	ATERRO	4,7	8077	1318,61	1319,51	1318,34	1,17	
NA03	-	INA	FUNDAÇÃO	4,7	139	1322,15	1322,81	1321,79	1,02	
NA04	E-E’	INA	FUNDAÇÃO	4,7	139	1317,82	1318,77	1317,27	1,50	
NA05	C-C’	INA	ATERRO	4,7	20	1313,12	1313,14	1313,18	0,06	Majoritariamente seco
NA06	C-C’	INA	FUNDAÇÃO	4,7	7755	1313,96	1314,60	1313,44	1,16	
NA07	C-C’	INA	FUNDAÇÃO	4,7	8031	1311,89	1312,76	1311,54	1,23	
NA08	E-E’	INA	FUNDAÇÃO	4,7	8090	1317,04	1318,07	1316,32	1,74	
NA09	C-C’	INA	FUNDAÇÃO	4,7	-	-	-	-	-	Seco durante todo o período.
NA10	-	INA	FUNDAÇÃO	4,7	140	1315,34	1316,48	1315,09	1,39	
PZ01	D-D’	PZ	ATERRO	2,2	71	1322,71	1323,38	1322,38	1,00	
PZ02	C-C’	PZ	ATERRO	2,2	75	1319,26	1320,98	1318,96	2,02	
PZ03	C-C’	PZ	FUNDAÇÃO	2,2	74	1318,18	1320,09	1317,91	2,18	
PZ04	D-D’	PZ	ATERRO	2,2	7	1317,19	1317,42	1316,98	0,44	
PZ05	C-C’	PZ	ATERRO	2,1	3	1314,82	1315,00	1314,72	0,28	
PZ06	C-C’	PZ	ATERRO	2,0	-	-	-	-	-	Seco durante todo o período.
PZ07	C-C’	PZ	FUNDAÇÃO	2,1	63	1311,80	1311,92	1311,62	0,30	
PZ08	E-E’	PZ	FUNDAÇÃO	7,5	202	1310,29	1310,83	1309,83	1,00	
PZ09	C-C’	PZ	FUNDAÇÃO	4,7	8084	1308,08	1309,13	1307,41	1,72	
PZ10	C-C’	PZ	FUNDAÇÃO	4,7	135	1307,54	1308,45	1307,32	1,13	
PZ11	-	PZ	FUNDAÇÃO	2,2	70	1307,02	1307,38	1306,82	0,56	
PZ12	-	PZ	VERTEDOURO	2,0	59	1326,03	1327,09	1324,25	2,84	

Fonte: Autor (2025)

Tabela 4.7 - Resumo das leituras do medidor de vazão

Instrumento	Período de Análise (ano)	Nº de Leituras	Vazão Med. (L/s)	Vazão Máx. (L/s)	Vazão. Mín. (L/s)
MV01	4,7	7701	2,23	9,14	0,75

Fonte: Autor (2025)

A seguir, apresenta-se uma análise detalhada dos instrumentos instalados na Barragem Estudo, com base nos gráficos de leitura histórica para cada instrumento, considerando dados a partir de 2020. Destaca-se que, em alguns gráficos, as cotas de topo e fundo dos instrumentos não foram incluídas para ajustar a escala vertical e assim ressaltar as variações nas leituras de cada instrumento, especialmente em comparação com as leituras do reservatório, no caso dos indicadores de nível d'água e piezômetros.

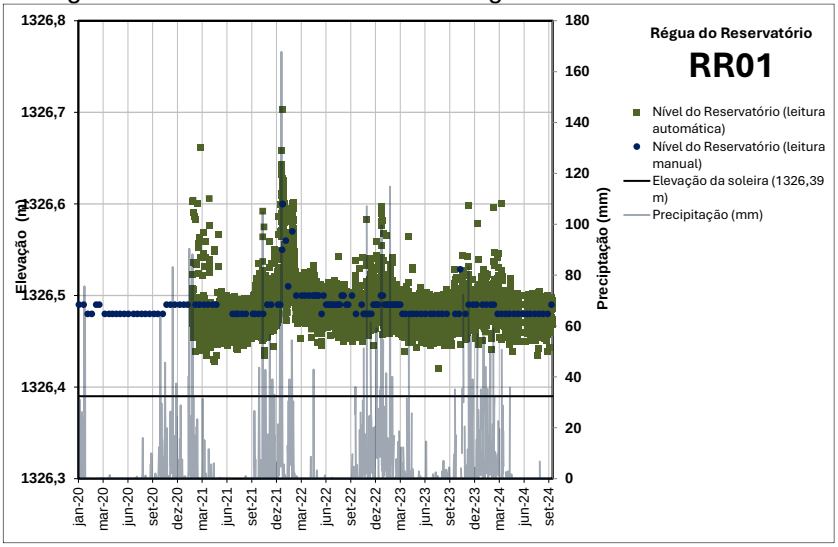
Optou-se, no entanto, por manter as cotas de topo e fundo na legenda dos gráficos, visando proporcionar uma referência comparativa que permita avaliar os valores de leitura em relação às cotas do instrumento, facilitando uma análise integrada e precisa dos dados registrados

4.4.1 **Nível do Reservatório**

O nível d'água no reservatório tem apresentado poucas oscilações ao longo do período analisado, abaixo dos 30 cm. Historicamente, foi registrado uma leitura máxima na El. 1.326,70 m e uma leitura mínima na El. 1.326,44 m, coerente com a pluviometria registrada da época uma vez que o registro de leitura máxima foi em período chuvoso e enquanto da leitura mínima foi período seco.

A Figura 4.14 apresenta de forma conjunta as leituras manuais e automáticas correspondentes ao nível do reservatório, na qual é possível observar compatibilidade dos registros. Observa-se que, ainda que o instrumento manual apresente menor precisão, há variações em períodos chuvosos coerentes com as variações registradas automaticamente pela régua com sensor ultrassónico.

Figura 4.14 - Gráfico de leituras da régua do reservatório RR01



Fonte: Autor (2025)

4.4.2 **Análise dos Indicadores de Nível de Água**

Como apresentado no item 4.3, a Barragem Estudo possui 10 Indicadores de Nível d'água (NA) com diferentes locais de instalação. É possível, contudo, dividir esses instrumentos em três grupos, pelos quais a análise semestral será apresentada, são eles: localizados na crista, localizados na berma e demais locações.

4.4.2.1 Indicadores de Nível de Água Locados na Crista:

Os indicadores de nível d'água NA01, NA02, NA03, NA04, instalados na crista da Barragem Estudo (Figura 4.15), apresentam oscilações entre 1,02 e 1,50 m. Contudo, o comportamento das leituras não apresenta grandes saltos em períodos curtos, essa oscilação ocorre de maneira gradual na passagem de período seco para chuvoso. Os valores de freática registrados por esses instrumentos estão, em média, entre a El 1.317,82 m e a El 1.322,45 m. Os maiores valores de freática são observados no NA01 localizado em região mais próxima a ombreira direita, sendo a leitura máxima na El 1.323,23 m.

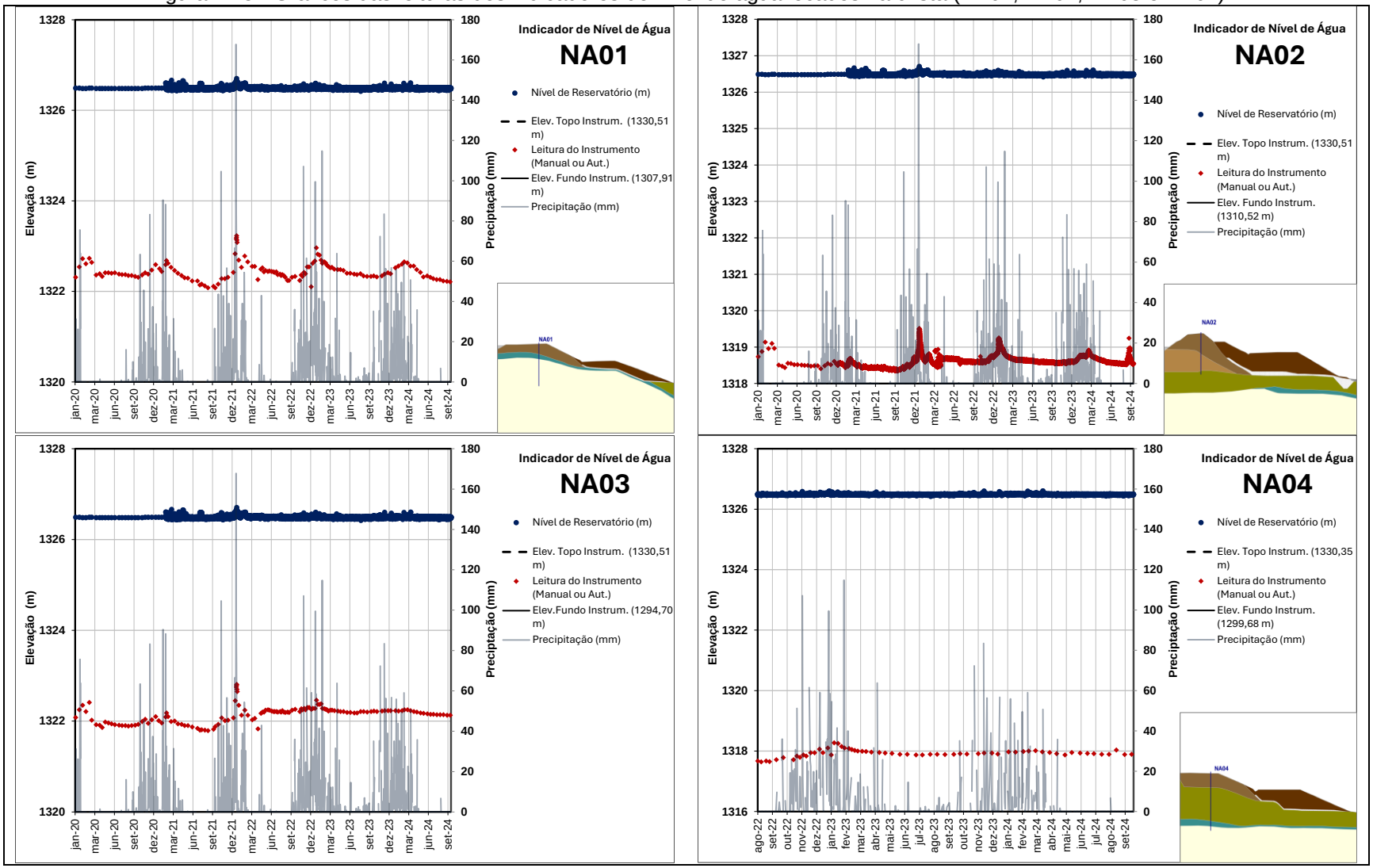
O NA02, instrumento automático, instalado na região central da crista e pertencente a seção crítica, registrou leitura máxima na El 1.319,51 m.

Quanto aos NA03 e NA04, eles apresentaram leitura máxima na El 1.322,81 m e El 1.317,82 m, respectivamente. Observa-se que o NA04 está localizado em uma

região da crista mais a jusante e distante do reservatório, dessa maneira a sua diminuição de nível freático em relação ao NA03 é coerente e esperado.

O NA01, já citado, além de apresentar os maiores níveis freáticos dentre os indicadores locados na crista, apresenta um comportamento de maior variação de leitura em relação a precipitação. De modo que, em seu histórico, tem-se uma variação acima de 1,0 m para os anos de 2022. Recentemente, nos anos de 2023 e 2024, as alterações registradas se mantém abaixo de 0,65 m.

Figura 4.15 - Gráficos das leituras dos indicadores de nível de água locados na crista (NA01, NA02, NA03 e NA04)



Fonte: Autor (2025)

4.4.2.2 Indicadores de nível de água localizados na berma:

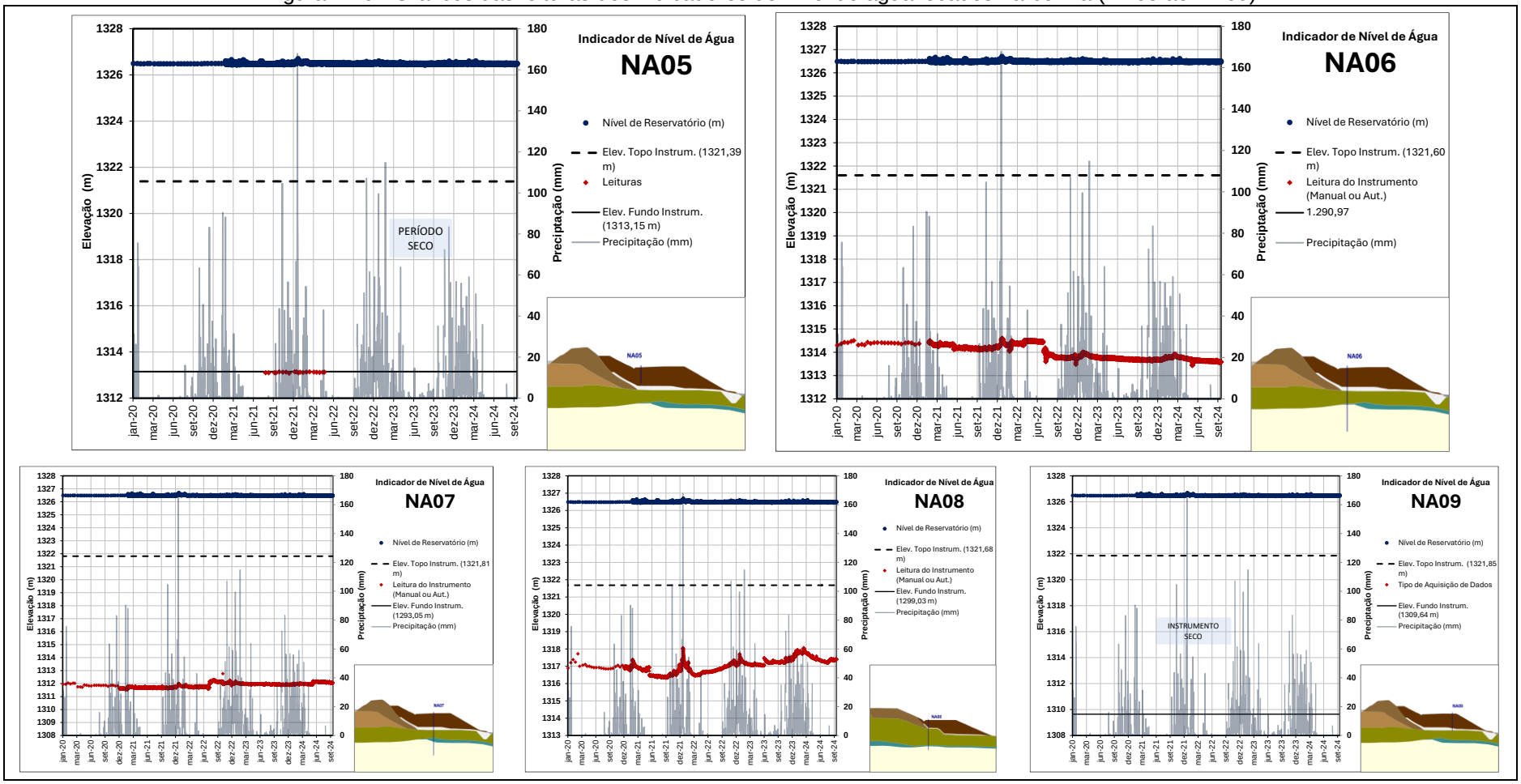
A região da berma da Barragem Estudo apresenta cinco indicadores de nível de água com diferentes profundidades (Figura 4.16). A freática nessa região, indicada pela instrumentação, variou, em média, de El 1.311,89 m a El 1.317,04 m dentro do período analisado.

Dentre esses instrumentos instalados na berma, dois apresentam recorrência de leituras secas NA05 e NA09. O indicador NA05, apresentou leituras apenas durante o período de 18/08/2021 a 09/05/2022, encontrando-se seco anteriormente. Observa-se que a maioria de suas leituras foram próximas à cota de fundo. Após esse período, o instrumento voltou a registrar leituras secas. O NA09 permaneceu seco durante todo o período histórico analisado. Os dois últimos instrumentos citados, NA05 e NA09, são os indicadores de nível de água que apresentam as menores profundidades dentre eles: 8,24 m e 12,21 m, respectivamente. Essa característica de profundidade, conjuntamente com sua localização na seção da barragem, aponta o bom funcionamento do sistema de drenagem nessas regiões.

Quanto aos demais indicadores instalados na berma, NA06, NA07 e NA08, observa-se que todos esses instrumentos são automáticos.

O NA06 apresenta historicamente leituras estáveis e compatíveis com as precipitações. O instrumento NA07 manteve-se estável durante o período analisado. Já o NA08, apresenta um acréscimo na média das leituras, ao encontro ao comportamento dos demais instrumentos e ao comportamento esperando em períodos secos.

Figura 4.16 - Gráficos das leituras dos indicadores de nível de água locados na berma (NA05 ao NA09)

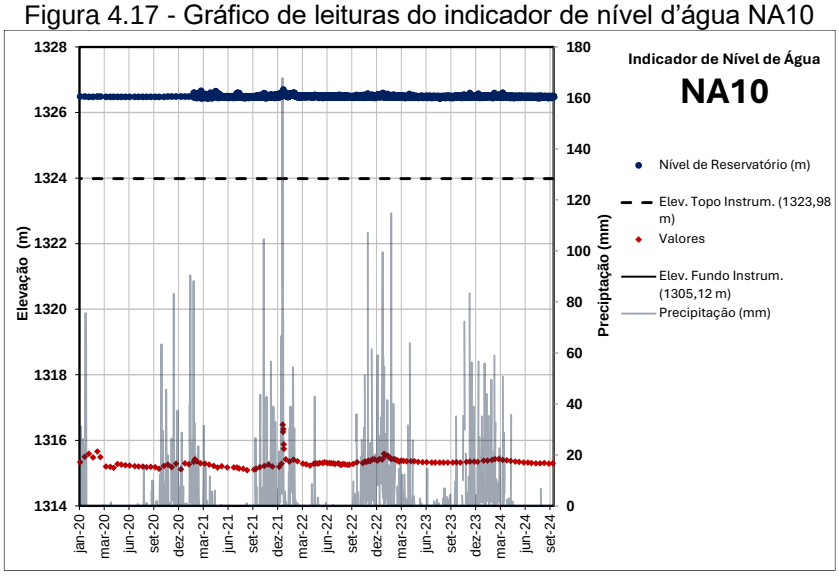


Fonte: Autor (2025)

4.4.2.3 Demais Locação e Comentários Finais:

Não pertencente aos dois grupos citados anteriormente, o NA10 (Figura 4.17) está instalado na região da ombreira esquerda da barragem e com furo na fundação. O NA10, historicamente, apresenta leituras estáveis e leitura máxima histórica na El 1.316,48 m.

Figura 4.17 - Gráfico de leituras do indicador de nível d'água NA10



Fonte: Autor (2025)

Analisando de maneira geral os indicadores de nível de água pertencentes ao sistema de monitoramento da Barragem Estudo, comenta-se que os instrumentos apresentaram leituras coerentes com o comportamento histórico, a variação do nível de reservatório e as precipitações. Além disso, com exceção do NA08, todos apresentam tendência de estabilização de leitura sem aumento anômalo.

4.4.3 **Análise dos Piezométricos**

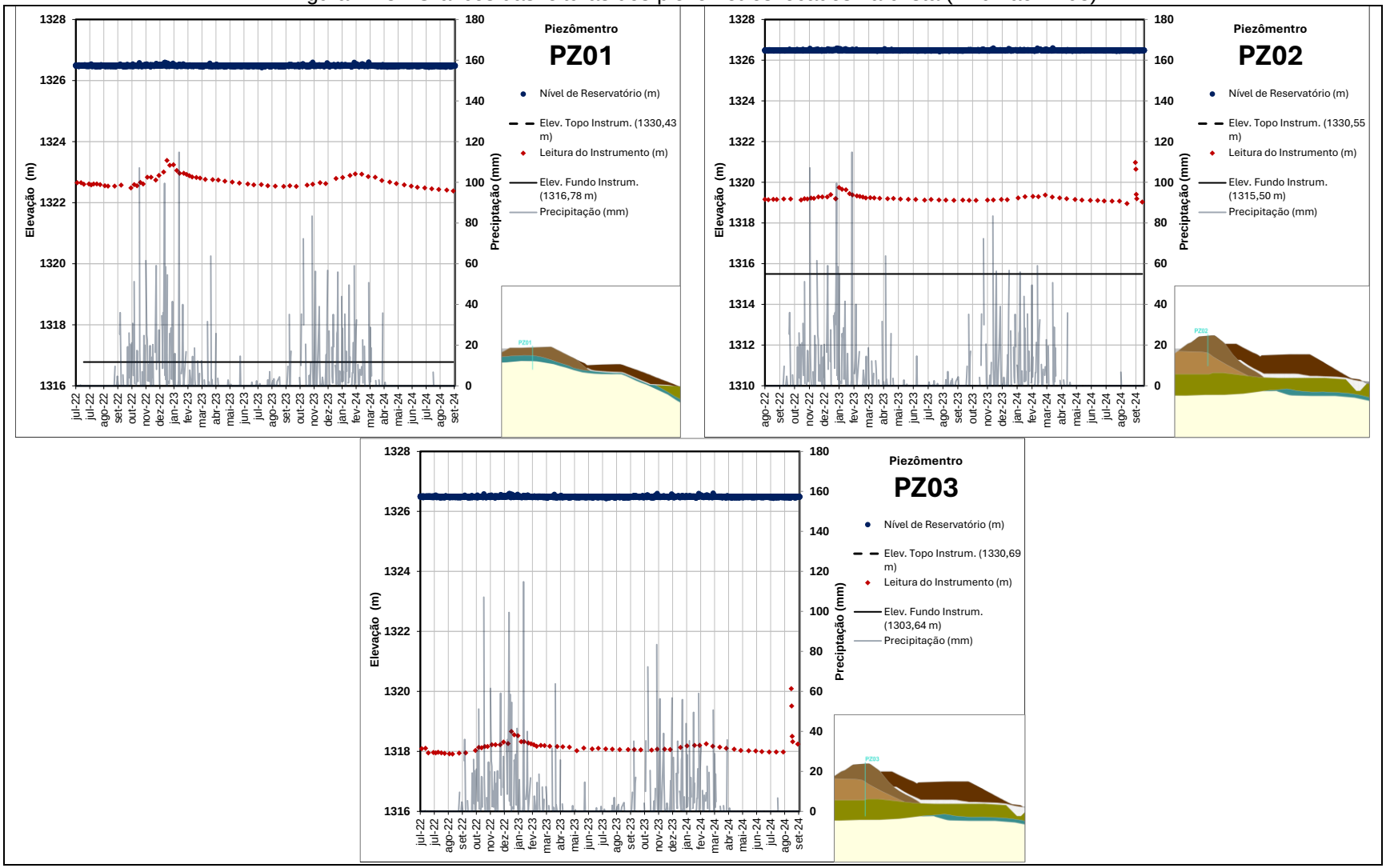
Assim como no caso dos indicadores de nível de água, os piezômetros da Barragem Estudo podem ser divididos em 3 grupos, são eles: localizados na crista, na berma e no pé da estrutura. Além disso, a depender da profundidade da instalação da célula drenante do piezômetro esse instrumento medirá a poropressão do aterro ou fundação. Essa distinção é relevante para as análises apresentadas na sequência.

4.4.3.1 Piezômetros Localizados na Crista:

Dos piezômetros instalados na região da crista da barragem, PZ01, PZ02 e PZ03 (Figura 4.18), os dois primeiros apresentam célula drenante instalada no aterro, enquanto o último apresenta célula drenante instalada na fundação. Os piezômetros com célula drenante no aterro, apresentaram leitura máxima na El 1.323,38 m e El 1.320,98 m, respectivamente. Comenta-se que enquanto o PZ02 está na região central da crista, o PZ01, com maiores valores de leitura, está em região mais próxima a ombreira direita da estrutura. Historicamente, esses instrumentos apresentam leitura estáveis, sendo as leituras do PZ01 com maior variação.

A respeito das subpressões monitoradas pelo PZ03, o valor de leitura máxima registrada foi de El 1.320,09 m. Historicamente, esse instrumento apresenta leituras estáveis com variações correspondentes ao período chuvoso.

Figura 4.18 - Gráficos das leituras dos piezômetros locados na crista (PZ01 ao PZ03)



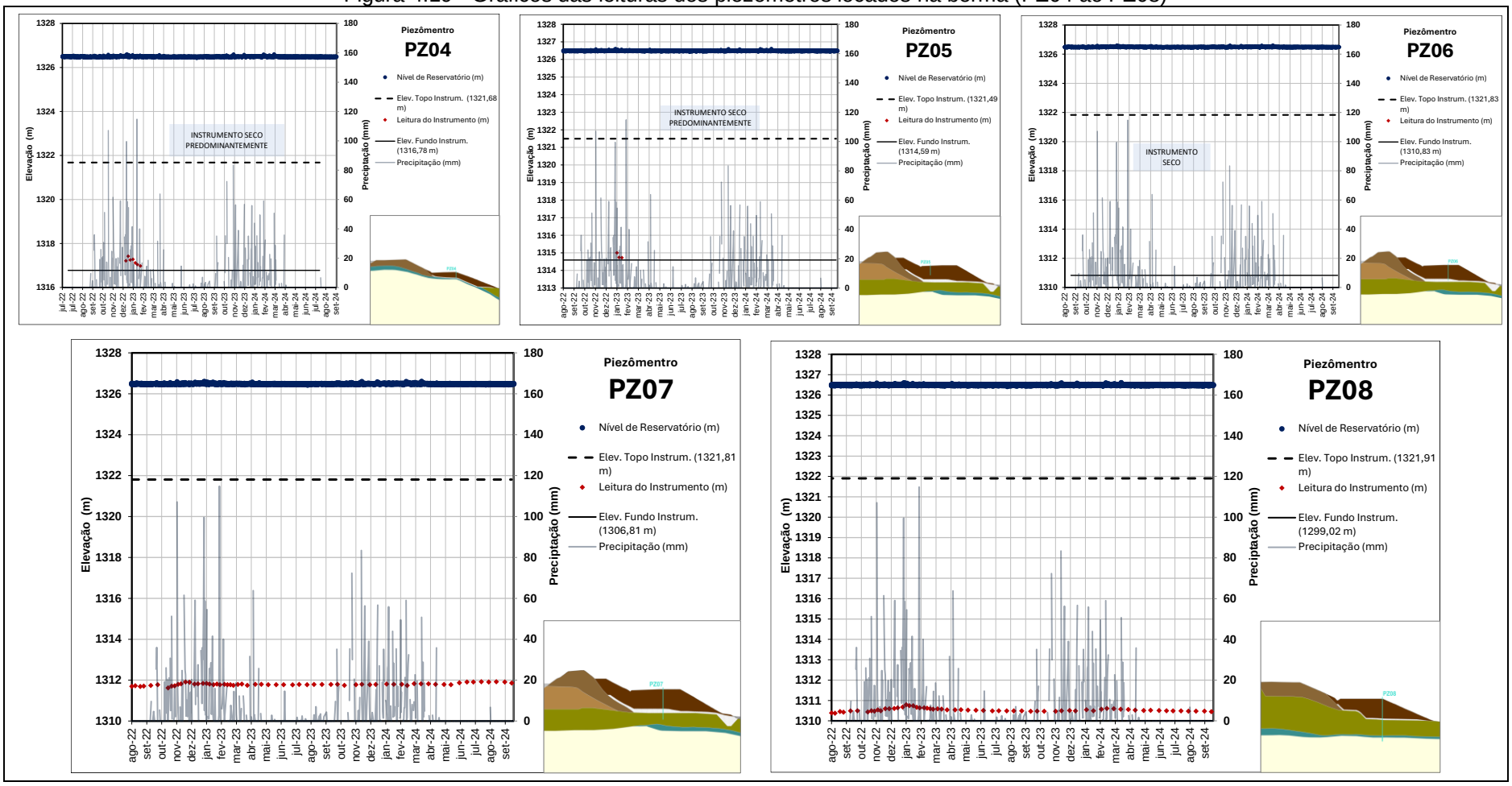
Fonte: Autor (2025)

4.4.3.2 Piezômetros Localizados na Berma:

Quanto aos piezômetros instalados na berma, três desses piezômetros se apresentam recorrência de leitura seca, são eles: PZ04, PZ05, PZ06 (Figura 4.19). Desses, o único piezômetro seco durante todo o histórico é o PZ06. Historicamente, a respeito do PZ04 e PZ05, esses apresentaram poucas leituras (7 e 3), a partir de janeiro de 2023, voltando a apresentar condição seca em fevereiro de 2023. Esses instrumentos apresentam célula acima do tapete drenante da barragem estudo, de modo que sua condição majoritariamente seca expressam o bom funcionamento do sistema de drenagem interna.

Quanto aos demais piezômetros, PZ07 e PZ08 (Figura 4.19), estes apresentam célula drenante na fundação. A respeito do PZ07, esse teve um comportamento de aumento atípico para o período seco de 2024, registrando leitura máxima na El 1311,92 m. Quanto ao PZ08, esse apresenta comportamento estável com poucas variações, tendo sido registrado a leitura máxima na El 1.310,83 m.

Figura 4.19 - Gráficos das leituras dos piezômetros locados na berma (PZ04 ao PZ08)



Fonte: Autor (2025)

4.4.3.3 Piezômetros Localizados no Pé do Talude:

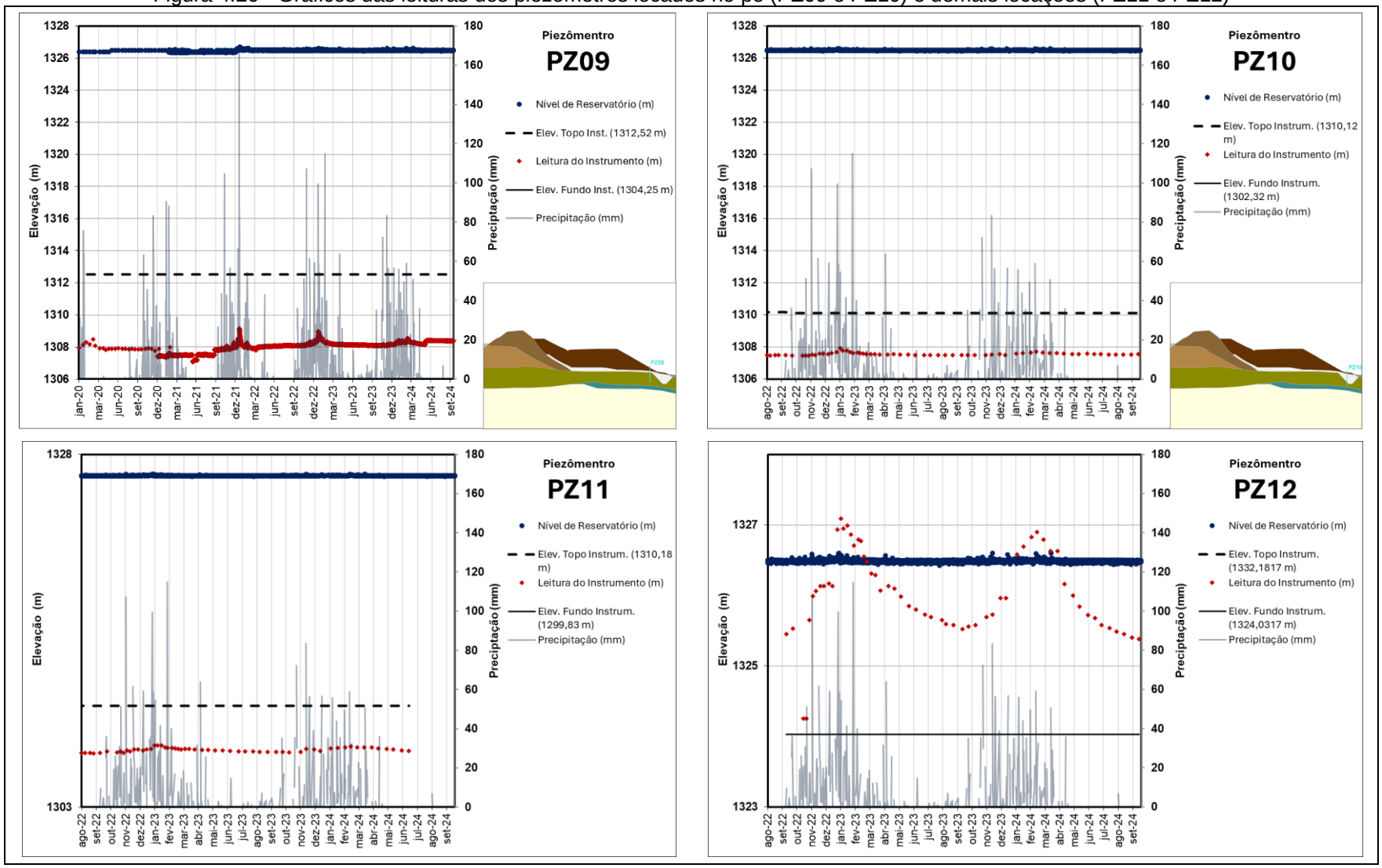
A região do pé da Barragem Estudo é monitorada por dois piezômetros, PZ09 e PZ10 (Figura 4.20), pertencentes a seção central (C-C') de estabilidade. Desses, o PZ09 é o único piezômetro automático do sistema de auscultação da barragem. Quanto ao comportamento, o PZ09 e PZ10 apresentaram valor máximo de leitura na El 1.309,13 m e El 1308,47 m, respectivamente.

O piezômetro PZ09 apresentou, ao longo do período histórico analisado, pequenas variações em períodos chuvosos, à medida em que o nível do reservatório aumentava. Já o CAPBRPZ006, possui leituras com oscilação de amplitude inferior a 0,5 m, exceto o dia 06/04/2020, no qual houve uma leitura com acréscimo de 1,7 m em relação à leitura anterior, aproximando-se da elevação de topo do instrumento, mas sem evento chuvoso relacionado. Acredita-se, portanto, que essa leitura pontual seja anômala de modo que não é apresentada no gráfico.

4.4.3.4 Demais Localizações

O PZ11, localizado ao lado do dreno de pé da estrutura, apresenta leituras estáveis, com leitura máxima na El 1.307,38 m. A respeito do piezômetro PZ12, localizado ao lado do vertedouro, esse apresenta uma maior variação de leitura, com valores de oscilação anual acima de 1,0 m.

Figura 4.20 - Gráficos das leituras dos piezômetros locados no pé (PZ09 e PZ10) e demais locações (PZ11 e PZ12)

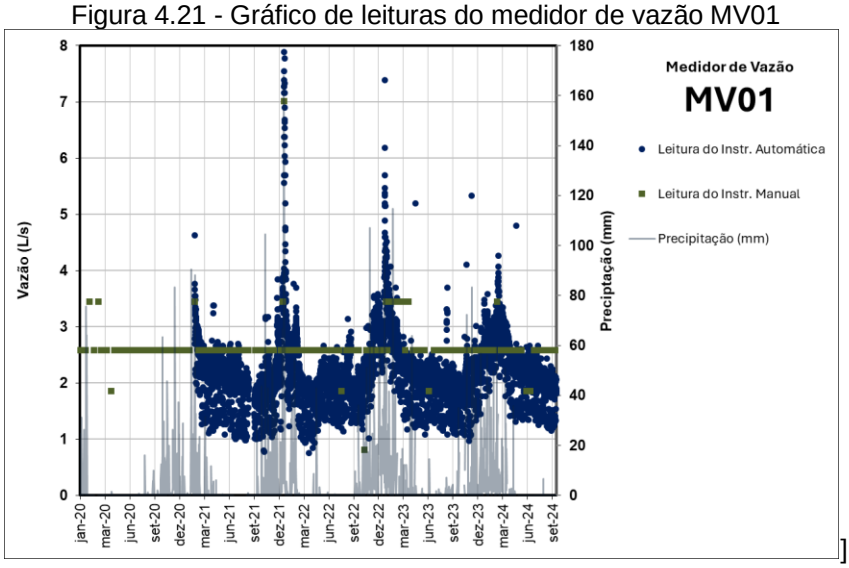


Fonte: Autor (2025)

4.4.4 **Medidor de Vazão**

O controle de vazão é realizado por meio do medidor de vazão triangular MV01 (Figura 4.21), instalado a jusante do dreno de pé, para monitoramento da vazão percolada pelo maciço e pela fundação da barragem. As vazões registradas pelo instrumento, anteriores ao processo de automatização, mantiveram-se em torno de 2,6 l/s desde dezembro de 2019, exceto as leituras dos dias 04/02/2020 (3,45 L/s), 06/03/2020 (3,45 L/s) e 22/04/2020 (1,85 L/s). Em fevereiro de 2021, o instrumento foi automatizado, com a instalação de um sensor ultrassônico que registra a distância em metro entre o instrumento e a lâmina d'água, realizando a conversão para vazão.

Figura 4.21 - Gráfico de leituras do medidor de vazão MV01



Fonte: Autor (2025)

4.4.5 **Análise Crítica dos Dados de Monitoramento**

A contribuição do sistema de instrumentação e do banco de dados gerado a partir das leituras registradas, sejam elas manuais ou automáticas, fornece uma base sólida para uma análise crítica dos dados. Contudo, este processo não representa o fim da fase de auscultação, pois etapas subsequentes à coleta são indispensáveis para um monitoramento completo e eficaz. Conforme Clarkson (2021), ao tratar-se de um sistema de monitoramento, um dos maiores desafios reside em assegurar que os dados coletados e processados não sejam confundidos com dados interpretados.

Seja na interpretação das leituras em relação ao modelo de percolação ou na utilização dessas leituras para validar ou definir os níveis de controle da barragem, a fase de consolidação e análise crítica dos dados do monitoramento é essencial, independentemente da metodologia adotada. Penna et al. (2017) destacam a importância desta fase anterior ao estabelecimento de níveis de controle, indicando algumas etapas fundamentais:

- Elaboração e validação da planta e das seções instrumentadas (transversais e longitudinais) da barragem, para assegurar que as informações dos instrumentos estão consistentes com as diferentes bases de dados;
- Verificação da consistência das leituras e do funcionamento dos instrumentos (incluindo testes de vida útil, calibração, entre outros);
- Elaboração de gráficos que apresentem as leituras dos instrumentos instalados, como nível de água do reservatório, piezômetros, indicadores de nível de água e medidores de vazão, além de dados de precipitação;
- Comparação das leituras do nível de água (NA) do reservatório com outras variáveis de interesse, como poropressões, vazões e deformações;
- Indicação nas seções instrumentadas das leituras mínimas, máximas e médias registradas nos piezômetros e indicadores de nível de água;
- Cálculo de gradientes hidráulicos a partir da posição e das medidas de poropressão dos piezômetros.

A análise crítica do comportamento da barragem é realizada com base nas informações coletadas, visando avaliar seu desempenho e identificar tendências de comportamento em relação a parâmetros como níveis piezométricos/freáticos, vazões dos sistemas de drenagem interna, ocupação do reservatório e outros aspectos relevantes. Ressalta-se ainda que, além das leituras dos instrumentos, os dados provenientes das inspeções visuais de campo são fundamentais para a compreensão do comportamento estrutural, constituindo, assim, um elemento fundamental no processo de gestão e monitoramento da barragem.

Somente a partir de uma compreensão integrada e aprofundada do comportamento da estrutura é possível definir a metodologia mais apropriada para a determinação dos níveis de controle na instrumentação. Essa abordagem integrada promove um monitoramento mais preciso e confiável, reforçando a segurança e a efetividade na gestão de barragens de mineração.

4.5 SOFTWARE SLIDE2 ROCSCIENCE

O software Slide2, desenvolvido pela Rocscience, é uma ferramenta especializada para a análise de estabilidade de taludes, baseada no método de equilíbrio limite em duas dimensões (2D). Ele é amplamente utilizado para calcular o fator de segurança ou a probabilidade de falha de superfícies de ruptura, sejam estas circulares ou não circulares, em taludes compostos por solo ou rocha. A metodologia empregada pelo Slide2 inclui tanto o equilíbrio limite de fatias verticais quanto de fatias não verticais. Além disso, o programa incorpora um módulo integrado de análise de infiltração de águas subterrâneas, utilizando o método de elementos finitos. Essa funcionalidade permite a avaliação das condições hidráulicas em taludes, considerando tanto o regime de fluxo estacionário quanto o transitório, o que é essencial para modelar cenários realistas e prever o comportamento estrutural em condições variadas.

No presente estudo, o Slide2 foi utilizado para modelar as seções da Barragem Estudo, avaliando o fator de segurança em diferentes cenários de saturação e fluxo de água. A Rocscience, empresa responsável pelo desenvolvimento do Slide2, disponibiliza em seu site(www.rocscience.com/help/slide2) uma visão geral do software, documentação detalhando as ferramentas, tutorias de aplicação dos recursos e verificação teórica da precisão das soluções computadas pelo programa.

Nesse subitem, serão apresentados de forma objetiva os principais recursos do Slide2 aplicados ao estudo, destacando suas funcionalidades e sua contribuição para a análise e os resultados alcançados.

4.5.1 **Análise de estabilidade por equilíbrio limite**

A análise de estabilidade de superfícies de deslizamento é realizada pelo SLIDE2 com o método de equilíbrio limite, que pode considerar fatias verticais ou não verticais. Superfícies de deslizamento individuais podem ser analisadas, ou métodos de busca podem ser aplicados para localizar a superfície de deslizamento crítica dentro de um limite de análise.

Nas configurações gerais do projeto, é possível especificar parâmetros fundamentais, como a direção esperada da falha (Failure Direction). Adicionalmente, a aba de métodos de análise permite a seleção de um ou mais métodos de equilíbrio limite disponíveis no SLIDE2, os quais incluem:

- Ordinário/Fellenius
- Bispo Simplificado
- Janbu simplificado
- Janbu corrigido
- Spencer
- Corpo de Engenheiros #1
- Corpo de Engenheiros #2
- Lowe-Karafiath
- Sarma (Método de corte vertical)
- GLE (General Limit Equilibrium) / Morgenstern-Price (equivalente ao método Morgenstern-Price)

O software permite a seleção de um ou mais métodos para realização da análise no SLIDE2. Após o acionamento do comando de computação, todos os métodos selecionados são executados simultaneamente no modelo. Além disso, o SLIDE2 disponibiliza uma caixa de diálogo denominada Opções de Superfície, na qual é possível definir:

- O tipo de superfície de deslizamento (circular ou não circular);
- O método de busca;
- Várias opções de filtro de superfície, como profundidade mínima e peso mínimo da superfície de ruptura procurada.

Dependendo do tipo de superfície selecionada, o SLIDE2 oferece diferentes métodos de busca. Para superfícies circulares, estão disponíveis os métodos Grid Search, Slope Search e Auto Refine Search. Por outro lado, no caso de superfícies não circulares, o software disponibiliza os métodos Block Search, Path Search, Simulated Annealing, Auto Refine Search e Cuckoo Search.

Destaca-se o método Auto Refine Search, que utiliza uma abordagem iterativa para refinar progressivamente a busca pelo menor fator de segurança. Durante esse

processo, os resultados de cada iteração orientam a delimitação da área de busca na próxima iteração. De acordo com Rosciencie (2024), o Auto Refine Search tem se mostrado eficaz na identificação da superfície de deslizamento com o menor fator de segurança (Global Minimum), frequentemente superando métodos como Grid Search e Slope Search, especialmente quando o número de superfícies geradas é equivalente.

4.5.2 **Percolação de Água por Elementos Finitos**

O recurso de análise de águas subterrâneas no software Slide2 utiliza o método de elementos finitos para modelar o fluxo de água em taludes. Essa funcionalidade permite a simulação de fluxo estacionário (*steady-state FEA*) e transitório (*transient*), possibilitando a definição de parâmetros como níveis freáticos, poropressões e fluxos em condições específicas.

Além disso, o Slide2 oferece suporte à definição de materiais com propriedades hidráulicas variadas, como condutividade hidráulica e porosidade, permitindo uma modelagem mais detalhada e realista. O software possibilita a incorporação de fontes e sumidouros de água no modelo, bem como a aplicação de condições de contorno personalizadas, o que contribui para uma simulação precisa do comportamento do fluxo hídrico no interior dos taludes.

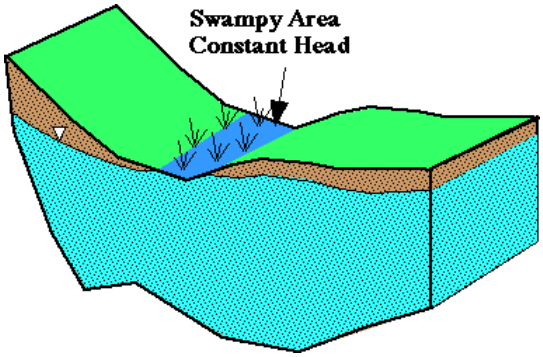
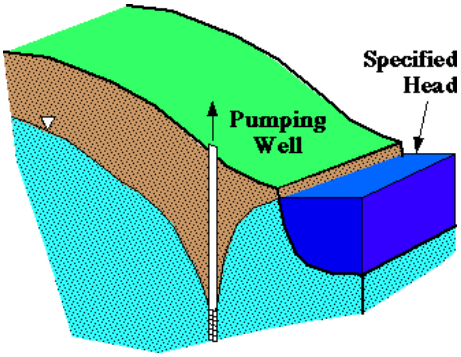
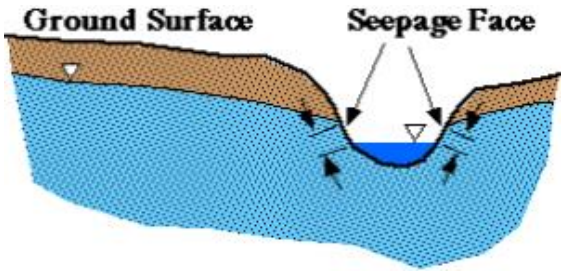
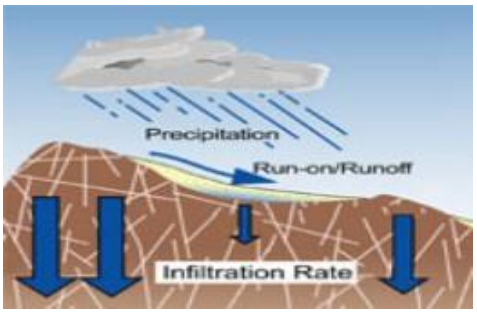
Lista-se a seguir três pontos essenciais para modelagem de percolação para fluxo estacionário:

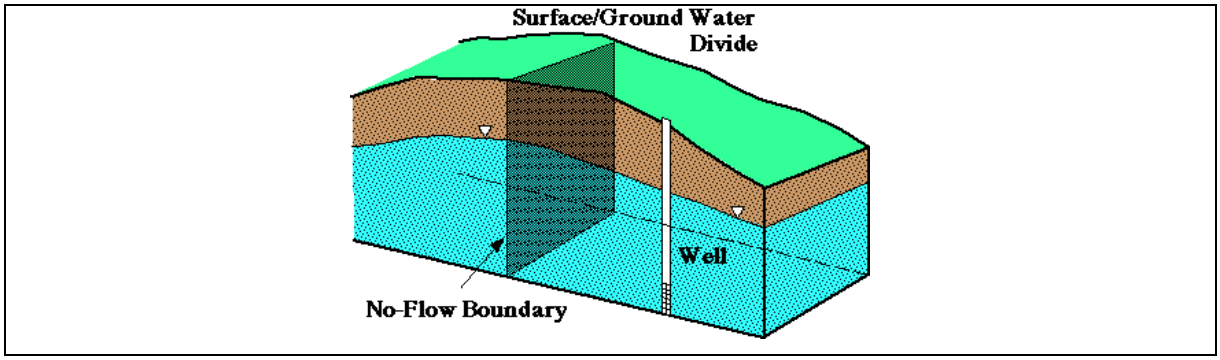
- Gerar uma malha de elementos finitos
- Definir condições de contorno
- Definir as propriedades hidráulicas (permeabilidades) dos materiais do talude

O Slide2 incorpora um gerador de malha de elementos finitos bidimensional automático de última geração, que oferece a possibilidade de criar malhas com base em elementos triangulares ou quadriláteros. Esse processo ocorre em duas etapas principais. Na primeira etapa, o comando Discretize subdivide os segmentos de linha de limite em elementos discretizados que formarão a base da malha. Na segunda etapa, o comando Mesh gera a malha de elementos finitos, considerando a discretização e os parâmetros previamente definidos.

Após gerar a malha, é necessário estabelecer condições de contorno hidráulicas para o modelo. O software oferece diversas opções para modelagem hidráulica, acessíveis por meio do painel *Set Boundary Conditions*. A Tabela 4.8 resume as definições das condições de contorno hidráulicas disponíveis no Slide2 e a visualização do painel de seleção.

Tabela 4.8 - Condições de contorno hidráulicas do Slide 2

<table>
<tr><td>(a) Carga Total (Total Head) -
• A carga em um determinado local não muda;
• Implica um suprimento inesgotável de água.
  </td><td>(b) Fluxo Nodal (Nodal Flow) -
• Taxa constante de injeção/extração de água;
• A altura manométrica é calculada para produzir o fluxo especificado.
  </td></tr>
<tr><td>(c) Face de Infiltração (Seepage Face) -
• Significa que a altura total (h) nunca deve exceder a altura de elevação (z);
• Modelado usando a condição de contorno Desconhecida.
  </td><td>(d) Infiltração (Infiltration) -
• Volume de água que entra ou sai de uma área (por exemplo, precipitação);
• Só pode ser aplicado a segmentos de linha e não a nós individuais.
  </td></tr>
<tr><td colspan="2">(e) Sem fluxo (No Flow)
• Semelhante ao fluxo nodal, exceto que o fluxo na fronteira é igual a zero;
• Pode ser usado para representar limites que produzem quantidades insignificantes de água para o sistema.</td></tr>
</table>



Fonte: Compilado de Rocscience (2024)

Por fim, é possível definir a condutividade hidráulica na janela de definições de propriedades hidráulicas, *Define Hydraulic Properties*. Nessa janela o Ks corresponde a permeabilidade saturada do material. Para descrever a permeabilidade na zona insaturada em função da sucção matricial, os seguintes modelos estão disponíveis no Slide2: Simples, Brooks e Corey, Fredlund e Xing, Jardineiro, Van Genuchten e Modelo Definido pelo Usuário. Sendo o modelo simples uma função de permeabilidade insaturada é automaticamente determinada pelo Slide2 com base na magnitude da permeabilidade saturada Ks e no Tipo de Solo selecionado. Além disso, quando aos parâmetros de permeabilidade anisotrópica, é possível definir a relação entre permeabilidade vertical e horizontal e o ângulo que especifica a direção da permeabilidade.

A partir dessas definições o mecanismo de computação de águas subterrâneas do SLIDE2 prosseguirá para executar a análise de infiltração por elementos finitos. Dentre os resultados da modelagem, a figura apresenta a visualização dos resultados da linha freática, em rosa. Por definição a linha freática é definida pela linha de contorno de carga piezométrica igual a zero. Além disso pode-se obter representações gráficas de pressões e fluxos.

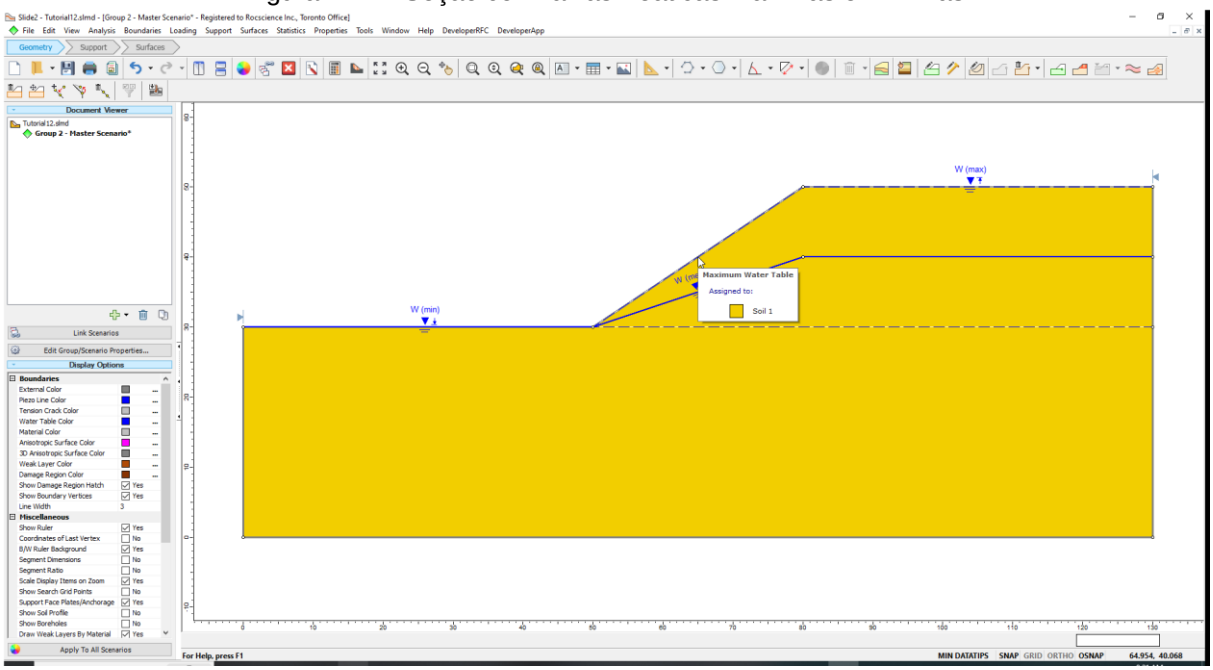
4.5.3 **Análise de sensibilidade**

Além dos recursos para análises convencionais de problemas geotécnicos, como estabilidade e percolação, o Slide2 oferece a funcionalidade de análise de sensibilidade. Este recurso permite avaliar os efeitos da incerteza ou variabilidade nos valores dos parâmetros de entrada sobre a estabilidade do modelo.

Adicionalmente, o Slide2 permite incorporar incertezas associadas ao lençol freático, fornecendo uma avaliação mais abrangente das condições de estabilidade

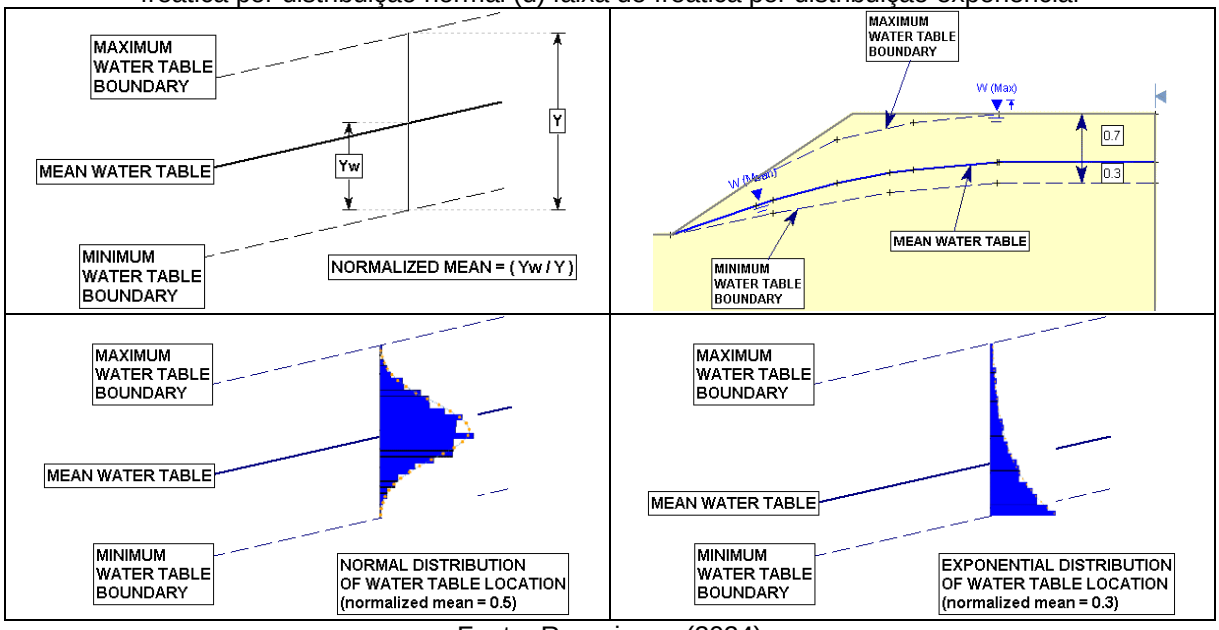
dos taludes. O recurso estatístico do software utiliza distribuições probabilísticas para representar as incertezas relativas à profundidade e ao comportamento do lençol freático, possibilitando a definição de faixas de variação com limites mínimo, máximo e valor médio, conforme Figura 4.22. Critérios estatísticos de média normalizada e distribuição estatística adotada são aplicados na análise, a Figura 4.23 apresenta ilustrativamente esses conceitos.

Figura 4.22 - Seção com faixas freáticas máximas e mínimas



Fonte: Rocscience (2024)

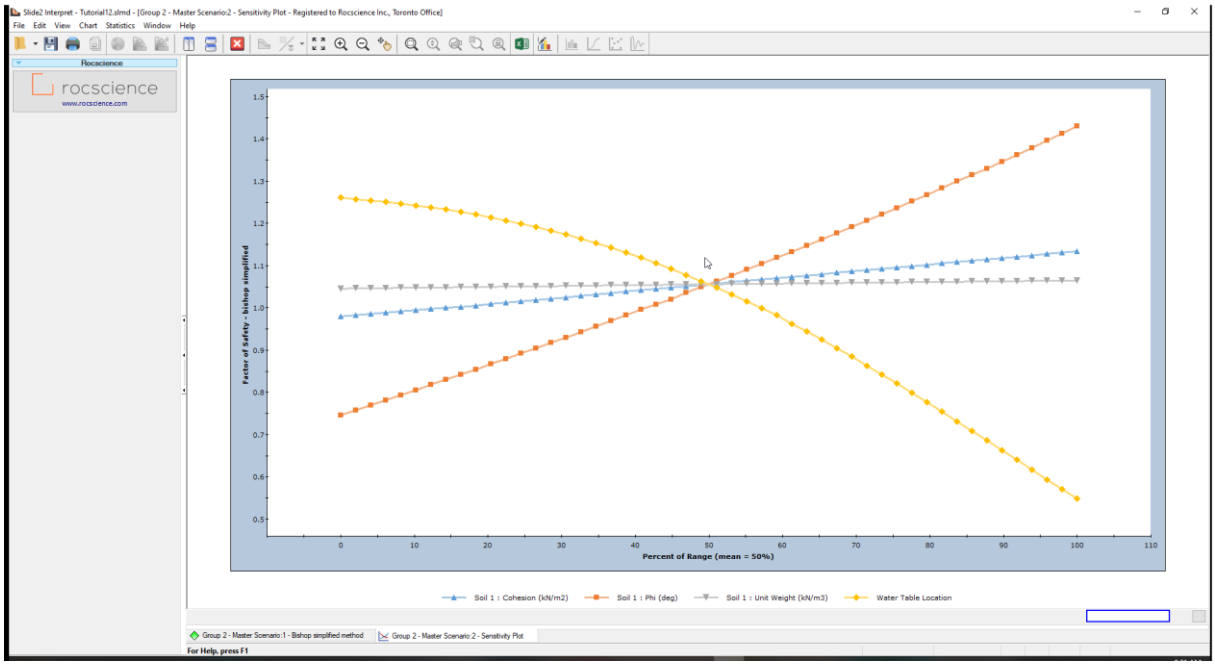
Figura 4.23 - (a) Esquemática das faixas adotadas para análise estática de superfície freática e definição de média normalizada (b) exemplo de aplicação para média normalizada de 0,3 (c) faixa de freática por distribuição normal (d) faixa de freática por distribuição exponencial



Fonte: Rocscience (2024)

Durante a análise, para cada variável selecionada, o intervalo entre os valores mínimo e máximo é dividido em 50 partes iguais. O fator de segurança para a superfície de deslizamento global mínima é recalculado em cada um desses valores, mantendo as demais variáveis constantes em seus valores médios. Esse processo gera gráficos do fator de segurança em função das variáveis analisadas, visualizados no Slide2 *Interpret*. Caso múltiplas variáveis sejam selecionadas, os gráficos são exibidos em conjunto para facilitar a interpretação, como apresentado na Figura 4.24, na qual é possível observar que o Ângulo de Atrito (laranja) e a Superfície Freática(amarelo) são os que mais impactam o fator de segurança.

Figura 4.24 - Gráfico de sensibilidade variando coesão, ângulo de atrito, peso específico e superfície freática



Fonte: Rocscience (2024)

4.6 METODOLOGIA DE DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE POR MODO DE FALHA

4.6.1 **Modos de falha não factíveis**

Avaliando os modos de falha apresentados no item 3.3, bem como as eventuais causas e mecanismo que poderiam estar associados a estes eventos em relação a Barragem Estudo, é possível concluir a respeito de modos de falha não factíveis:

- **Galgamento:** A avaliação da possibilidade física da ocorrência desse modo de falha é apresentada através de verificações hidráulicas e estudo de trânsito de cheias para a ocorrência da Precipitação Máxima Provável (PMP) na bacia de contribuição da Barragem Estudo. Por meio dos dados disponibilizados para a dissertação, os quais comprovam borda livre superior a 1,5 m na PMP, conclui-se que o galgamento não é um modo de falha factível para a estrutura.
- **Liquefação Estática:** Para que o fenômeno da liquefação ocorra há necessidade de que os materiais apresentem características específicas (saturados, sem coesão e com comportamento contrátil) e que ocorra um gatilho. Ao encontro dessas considerações, Olson (2001) considera como critério inicial para avaliação de liquefação a avaliação da suscetibilidade de liquefação. Essas considerações não são percebidas para a Barragem Estudo. Dentro deste contexto, os materiais do aterro e de fundação descritos nos itens anteriores não se enquadram critério de suscetibilidade à liquefação.

4.6.2 **Modos de falha factíveis em relação parâmetros medidos**

Considerando os modos de falhas factíveis para a Barragem Estudo, e as associações destes com os parâmetros monitoráveis no sistema de instrumentação apresentadas na Tabela 3.10. Serão considerados para o estabelecimento direto dos níveis de controle por meio do modelo de percolação, as relações com os modos de falha na fundação, erosão interna e instabilidade estática. Recomenda-se para o modo de falha de evento sísmico, a associação dessa análise em abordagem de verificação e validação do modo de falha adotado, conforme estudo sismológico para a região da barragem.

A determinação de nível de controle por modelo de percolação que será apresentada poderá ser feita para instrumentos responsáveis por medir freática ou parâmetros relacionados (piezômetros, indicadores de nível de água, régua do reservatório e medidor de vazão). De modo que, para estabelecimento de níveis de controle para monitoramento de grandezas de deslocamento, por exemplo, há uma limitação do modelo, sendo aplicável nesse caso modelo de tensão-deformação.

Somado a isso, tendo em vista a dispersão nos resultados associados às medidas de deslocamentos/deformações da Barragem Estudo, não há uma compreensão solidificada da grandeza das reações deformações da estrutura e, neste primeiro momento, para este trabalho, a metodologia será aplicada apenas para os piezômetros, indicadores de nível de água e medidores de vazão da drenagem interna.

Portanto, os modos de falha analisados em relação aos parâmetros alvo de estabelecimento de níveis de controle estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Modos de falha factíveis para Barragem Estudo em relação a instrumentação disponível

Modos de Falha / Parâmetro	Falha na Fundação	Erosão Interna	Infiltração	Evento sísmico	Instabilidade Estática
Superfície Freática	Apoio	Apoio	Direto	Apoio	Apoio
Poropressão	Direto	Apoio	Direto	Apoio	Direto
Fluxo de Infiltração	Direto	Direto	Direto	Apoio	Direto
Clima	Apoio	Apoio	Apoio	Apoio	Apoio

Fonte: Autor (2025) baseado em Clarkson (2021)

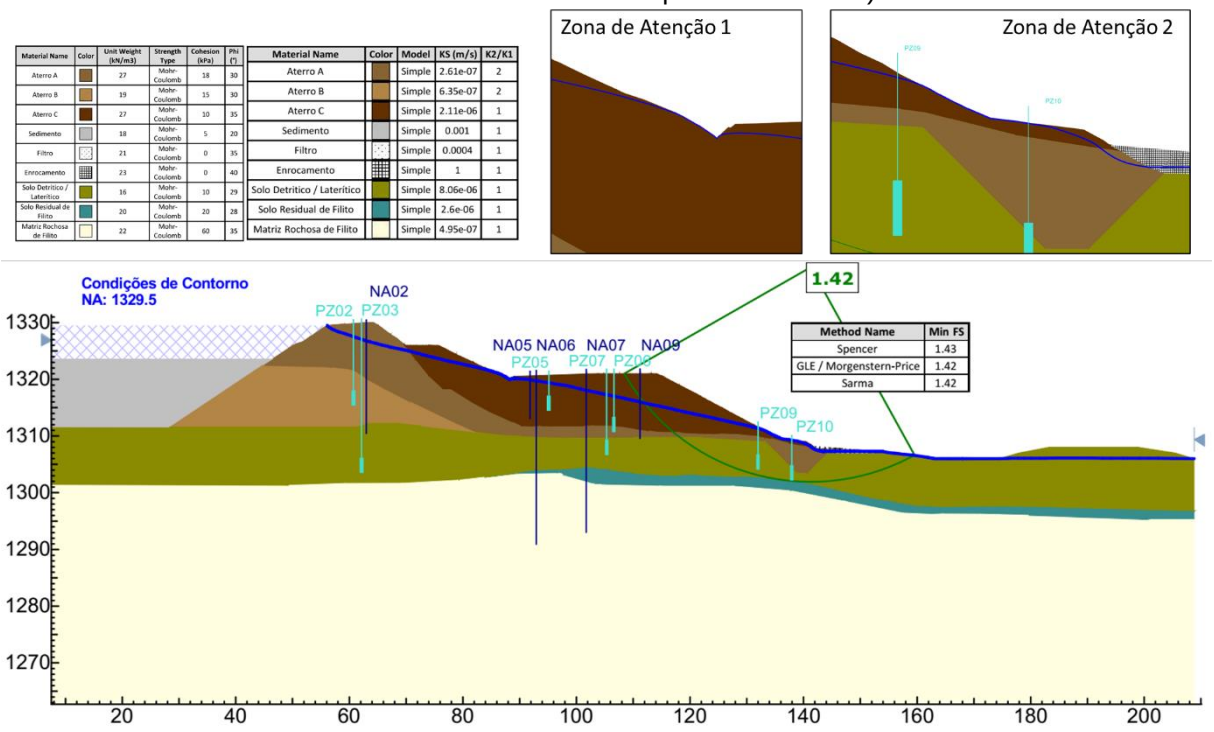
4.6.3 **Metodologia**

No que se refere à avaliação da perda de estabilidade devido à variação da carga piezométrica, a Barragem Estudo apresentou fatores de segurança superiores aos estabelecidos pela Norma NBR 13.028(2024), mesmo em cenários críticos com elevados níveis freáticos no interior do maciço. A Figura 4.25 ilustra a análise de estabilidade da estrutura considerando o sistema de drenagem comprometido e o nível máximo do reservatório, conforme detalhado nos pontos abaixo. Observa-se que o fator de segurança em relação à estabilidade estática permanece acima de 1,30. As condições de análise são descritas a seguir:

- Sistema de drenagem comprometido: Adotou-se uma condição de colmatação total do filtro da barragem, o qual passou a apresentar permeabilidade equivalente ao material montante, aterro A.

- Nível máximo do reservatório: Definiu-se como condição de contorno montante o nível de água no reservatório correspondente à altura da crista da barragem, cota 1329,50 m.

Figura 4.25 - Análise de Estabilidade e Percolação em Cenário Crítico (colmatação total do filtro e nível do reservatório correspondente a crista)



Fonte: Autor (2025)

Embora os fatores de segurança permaneçam acima do mínimo normativo, a análise revelou zonas de atenção onde a linha freática atinge a superfície do talude jusante, o que pode gerar surgências, evidenciadas nas janelas de zoom da Figura 4.25. Nota-se que, conforme Znidarcic et al (2024), qualquer surgência descontrolada fora dos componentes drenantes compromete a estabilidade da barragem e pode ser um indicador de uma falha catastrófica iminente (em larga escala) ou pode levar à deterioração gradual das condições de estabilidade, por exemplo, uma falha progressiva devido à lavagem do material causada pelos altos gradientes de saída.

Essa condição está associada ao modo de falha por *piping*. Nesse cenário, o fluxo de água que alcança a superfície pode transportar partículas do material da barragem, iniciando processos de erosão regressiva. Esses fenômenos foram identificados em duas regiões distintas da barragem, indicando áreas que requerem atenção especial para evitar agravamento das condições estruturais.

Diante disso, a aplicação da metodologia clássica de estabelecimento de carta de risco, em que os níveis de controle são definidos com a variação do fator de

segurança em função do aumento das pressões neutras, correspondente à elevação do nível freático, não é aplicável à barragem. Apesar de os fatores de segurança contra a ruptura por equilíbrio limite serem adequados, a avaliação da segurança pelo monitoramento deve abranger outros modos de falha, como o *piping*. Nesse contexto, observa-se na Figura 4.25 que, embora os fatores de segurança atendam à norma, o modelo de percolação indica a presença de uma superfície freática próxima à face do talude, especialmente no pé e na região da berma. Essa condição deve ser considerada na definição de níveis de controle.

Embora o aumento das pressões neutras não comprometa diretamente a estabilidade física da Barragem Estudo, o monitoramento adequado é essencial para garantir o desempenho estrutural, especialmente no que diz respeito ao sistema de drenagem interna. Por essa razão, a metodologia proposta inclui a avaliação das poropressões em função da perda de desempenho do sistema de drenagem, expressa pela colmatação, para estabelecer níveis de controle.

O estudo considerou três cenários correspondentes aos níveis de atenção, alerta e emergência estabelecidos para a instrumentação. Esses cenários foram calibrados em ordem crescente de perda de desempenho do sistema de drenagem, com percentuais de colmatação de 75%, 85% e 95%, respectivamente. Essas porcentagens, por sua vez, representam a proximidade da percolação do filtro em relação à percolação do material a montante, que, neste caso, é o Aterro A. Dessa forma, o cálculo da permeabilidade do sistema de drenagem (filtro e enrocamento) em cenários de perda de desempenho é apresentado nas equações (15), (16) e (17).

$$K_{MF75\%} = (K_{AT} - K_{MF}) * 75\% + K_{AT} \quad (15)$$

$$K_{MF85\%} = (K_{AT} - K_{MF}) * 85\% + K_{AT} \quad (16)$$

$$K_{MF95\%} = (K_{AT} - K_{MF}) * 95\% + K_{AT} \quad (17)$$

Em que AK_{MF} é a permeabilidade do material filtrante, K_{AT} é a permeabilidade do Aterro A, e $K_{MFX\%}$ representa a permeabilidade do material filtrante com X% de perda de desempenho.

Observa-se que as porcentagens de colmatação adotadas nos modelos têm caráter representativo e são utilizadas como artifício para a avaliação da segurança da estrutura. Tais valores não necessariamente refletem a condição atual do sistema de drenagem interna, mas sim simulam cenários hipotéticos que permitem avaliar o desempenho da barragem no modelo de percolação.

Quanto ao cenário de colmatação total, 100% de perda de desempenho, apresenta a linha freática atingindo a superfície do talude, o que, embora seguro do ponto de vista da estabilidade, é uma condição extrema e indesejada. Por esse motivo, adotaram-se percentuais menores nas análises, garantindo uma margem de segurança e tempo de ação para intervenções, se necessário.

Considerando, contudo, a possibilidade de nível de atenção com percentual de colmatação de 75%, apresenta-se acima da faixa das leituras comuns do instrumento. Nessa situação os níveis estabelecidos podem não ser aplicáveis a avaliação do comportamento do instrumento. Um caso por exemplo de salto de leitura em que o instrumento experimenta níveis de leitura acima de todas as leituras registradas anteriormente, ainda que não seja acima de freática de controle, deve ser avaliada. Diante disso, será considerada a adição de níveis localizados para o instrumento, a fim de permitir a detecção de mudanças em incrementos menores e fornecer alertas antecipados de possíveis problemas antes que eles aumentem. Portanto, adotar-se-á uma abordagem estatística, onde o gatilho de alerta corresponde a leituras que excedem as leituras máximas históricas.

Quanto ao nível do reservatório, apesar de a estrutura estar segura em relação ao galgamento, foi considerado o comportamento histórico, com base em leituras da régua e cálculos de trânsito de cheia máxima (PMP), para definição dos níveis de atenção, alerta e emergência. A análise do histórico indica um nível máximo registrado de 1326,70 m, sendo desconhecido o comportamento da estrutura para cotas superiores. Assim, adotou-se o nível máximo histórico como limite de atenção, visando monitorar o comportamento da barragem diante de condições não experimentadas. O nível de emergência foi associado à cheia máxima provável (PMP), conforme avaliação hidráulica disponível, correspondente à cota 1327,98 m. Por fim, o nível de alerta foi definido como uma elevação equidistante entre os níveis de atenção e emergência, ou seja, cota 1327,34 m.

A Tabela 4.10 apresenta as caracterizações dos cenários para o estabelecimento dos níveis de controle.

Tabela 4.10 - Síntese das características da cenários de nível avaliadas

Cenários de Nível	Descrição	Características			
		Colmatação	NA Reservatório	Borda Livre	Dif. PMP
Atenção	Nível de Controle correspondente a freática com 75% de colmatação ou nível máximo histórico registrado pelo instrumento	75%	1326,7 m	2,8 m	1,28 m
Alerta	Nível de Controle correspondente a freática com 85% de colmatação	85%	1327,34 m	2,16 m	0,64 m
Emergência	Nível de Controle correspondente a freática com 95%	95%	1327,98 m	1,52 m	0 m

5 RESULTADOS

Os resultados apresentam-se divididos em três tópicos, inicialmente será apresentado uma análise dos níveis freáticos e piezométricos medidos pelo sistema de instrumentação em relação a seção da barragem. Posteriormente, foi realizada uma calibração do modelo de percolação com base nos dados de instrumentação e de parâmetros de permeabilidade disponibilizados. Por fim, serão apresentados os níveis de controle estabelecidos conforme metodologia descrita nesse estudo.

Observa-se que, as análises serão realizadas com base no modelo de percolação da seção central (C-C') da Barragem Estudo e posteriormente replicada para as seções de ombreira, com devidos ajustes e comentários.

As análises de estabilidade e de percolação foram realizadas no software SLIDE2 2024, desenvolvido pela Rocscience, adotando-se:

- Critério de ruptura de Mohr-Coulomb;
- Métodos de equilíbrio-limite de Spencer, Morgenstern-Price e Sarma;
- Superfícies de ruptura circulares e poligonais.

5.1 COMPORTAMENTO DA PERCOLAÇÃO MEDIDA PELA INSTRUMENTAÇÃO

Inicialmente, a avaliação dos dados de monitoramento foi realizada separando os parâmetros de nível freático, poropressão no aterro e poropressão na fundação. Com base nas leituras médias, mínimas e máximas registradas pelos instrumentos, as leituras foram traçadas de acordo com a localização de cada dispositivo na seção da barragem. Para garantir a representatividade dos dados, foram adotados critérios específicos para sua utilização. Instrumentos que apresentaram leituras exclusivamente durante períodos chuvosos não foram considerados no traçado, pois suas leituras médias não refletem as condições normais da estrutura. Por outro lado, instrumentos secos, dependendo de sua posição em relação à linha freática, foram excluídos do traçado ou considerados apenas com a leitura correspondente à sua cota base.

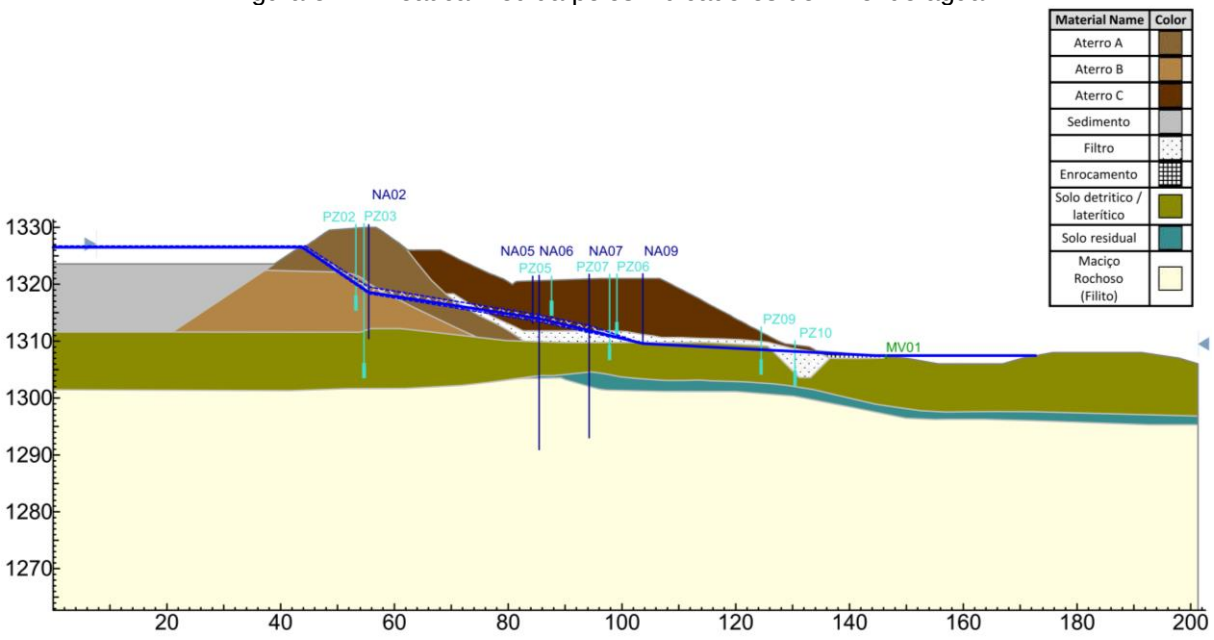
Nos próximos parágrafos, detalha-se a avaliação realizada para cada parâmetro monitorado.

5.1.1 Avalição do nível freático

Para a análise do nível freático, foram utilizados os dados de instrumentos com leituras contínuas de indicadores de nível d'água. Nesse contexto, os instrumentos NA05 e NA09 não foram considerados. O NA05, embora registre leituras durante períodos chuvosos, apresenta médias que não representam a condição típica da estrutura. Já o NA09 permaneceu seco em todo o histórico monitorado, inviabilizando seu traçado em seção. Contudo, como as leituras em períodos chuvosos do NA05 e do NA06 são similares, o comportamento do NA05 em cenários chuvosos está implicitamente representado pelas medições máximas do NA06.

A Figura 5.1 ilustra o resultado desta análise. Observa-se que a Barragem Estudo apresenta variações reduzidas no nível freático, comportamento consistente com as pequenas oscilações registradas no reservatório.

Figura 5.1 - Freática medida pelos indicadores de nível de água



Fonte: Autor (2025)

5.1.2 Avaliação da poropressão do aterro

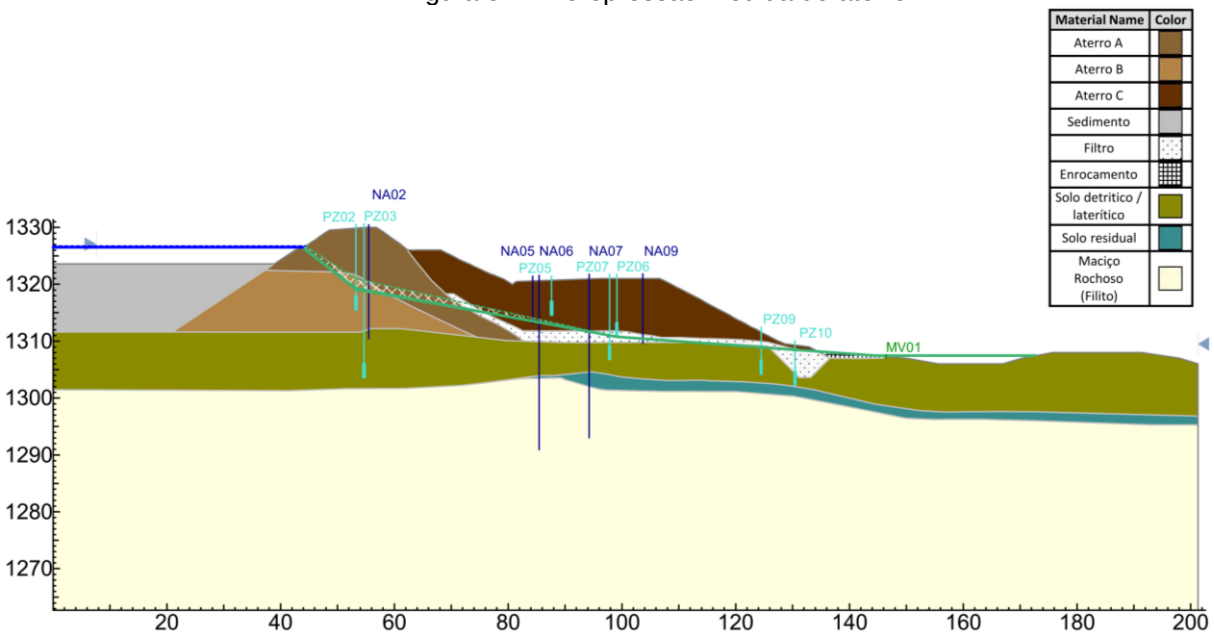
Para a avaliação da poropressão no aterro, consideraram-se todos os piezômetros localizados na seção central com célula drenante posicionada no aterro, especificamente os instrumentos PZ02, PZ05 e PZ07. Desses, apenas o PZ02

apresentou leituras, caracterizadas por uma pequena variação, como mostrado na Figura 5.2.

O comportamento seco dos instrumentos PZ05 e PZ06 é considerado preferível para a segurança da barragem, uma vez que estão localizados acima do tapete drenante da estrutura, o que reflete o funcionamento adequado do sistema de drenagem nessa região. Entretanto, no caso do PZ05, devido à sua profundidade limitada a 8 m, existe a possibilidade de ocorrência de poropressão acima do tapete drenante, a qual não pode ser detectada por este instrumento. Para uma análise mais abrangente e precisa, é essencial correlacionar seus dados com as leituras dos instrumentos próximos, tais como o NA05 e NA06.

Por outro lado, o PZ06, cuja célula drenante está posicionada logo acima do tapete, apresenta evidências de que a poropressão na região está dissipada pelo funcionamento eficiente do tapete drenante.

Figura 5.2 - Poropressão medida do aterro



Fonte: Autor (2025)

5.1.3 **Avaliação da poropressão da fundação**

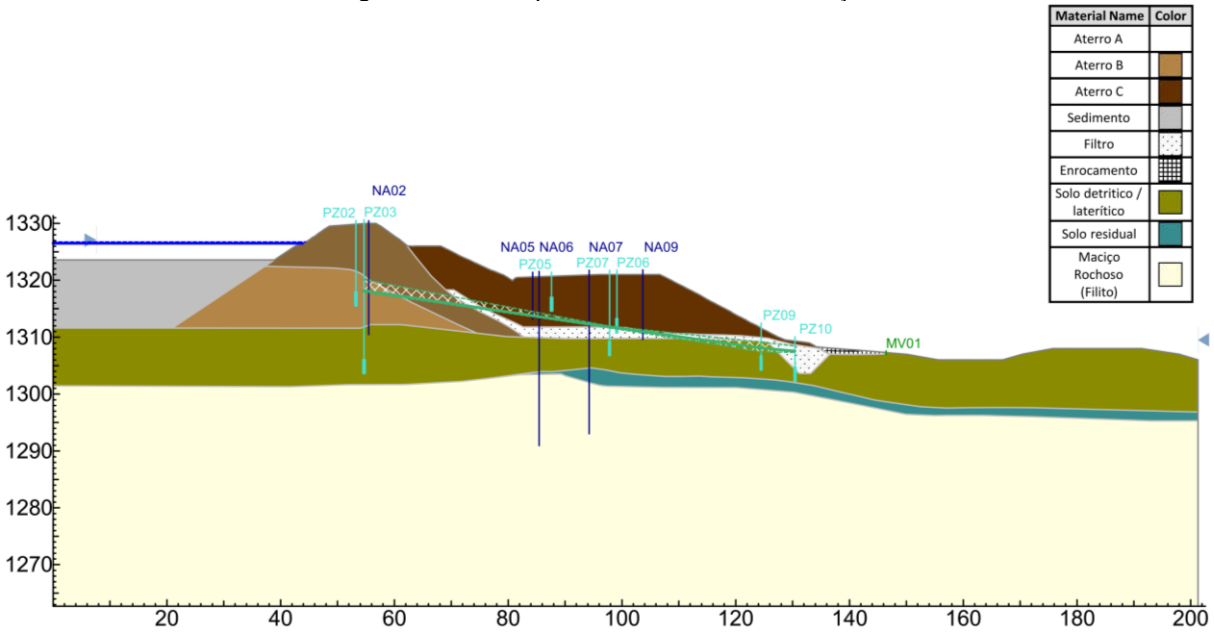
A análise das subpressões na Barragem Estudo considerou os piezômetros equipados com célula drenante instalados na fundação, especificamente os instrumentos PZ03, PZ07, PZ09 e PZ10. Todos os piezômetros apresentaram leituras contínuas, caracterizadas por variações relativamente pequenas. As maiores

variações foram observadas no PZ03, localizado na crista, devido à sua maior sensibilidade às oscilações do reservatório, como ilustrado na Figura 5.3.

O PZ07 registrou um decréscimo significativo em relação ao piezômetro situado a montante, comportamento atribuído à dissipação das subpressões proporcionada pelo tapete drenante.

Os piezômetros localizados no pé do talude da berma, PZ09 e PZ10, por estarem próximos à saída do dreno de pé, apresentaram leituras mais relacionadas ao nível freático nessa região. Esses valores mostraram-se consistentes com as leituras da régua do medidor de vazão situado a jusante.

Figura 5.3 - Poropressão medida da fundação

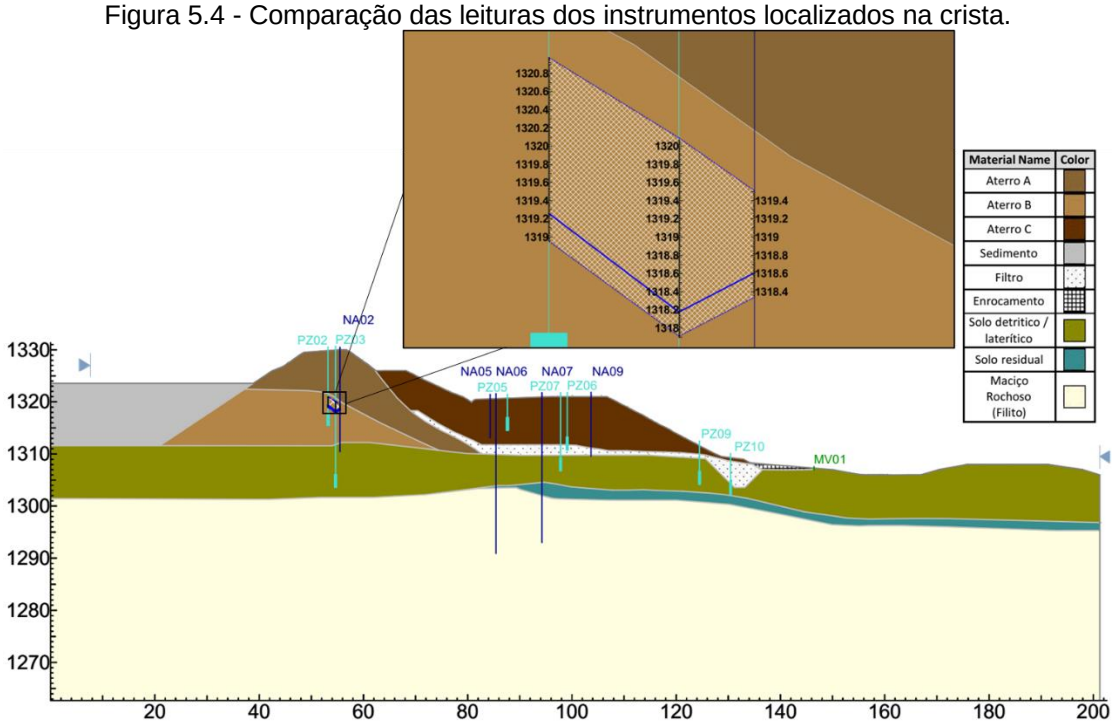


Fonte: Autor (2025)

5.1.4 **Avaliação conjunta**

Comparativamente, verifica-se que as leituras dos instrumentos na crista apresentam grandezas semelhantes. Ao comparar os dados do PZ02 e PZ03, a diferença entre eles é de cerca de 1 metro, conforme ilustrado na Figura 5.4. Essa proximidade nas leituras pode estar associada à similaridade na permeabilidade do solo detrito e do aterro B, cujas permeabilidades médias são de $6{,}35 \times 10^{-07}$m/s e $8{,}06 \times 10^{-06}$m/s, respectivamente, conforme descrito no item 4.2.2.

Figura 5.4 - Comparação das leituras dos instrumentos localizados na crista.



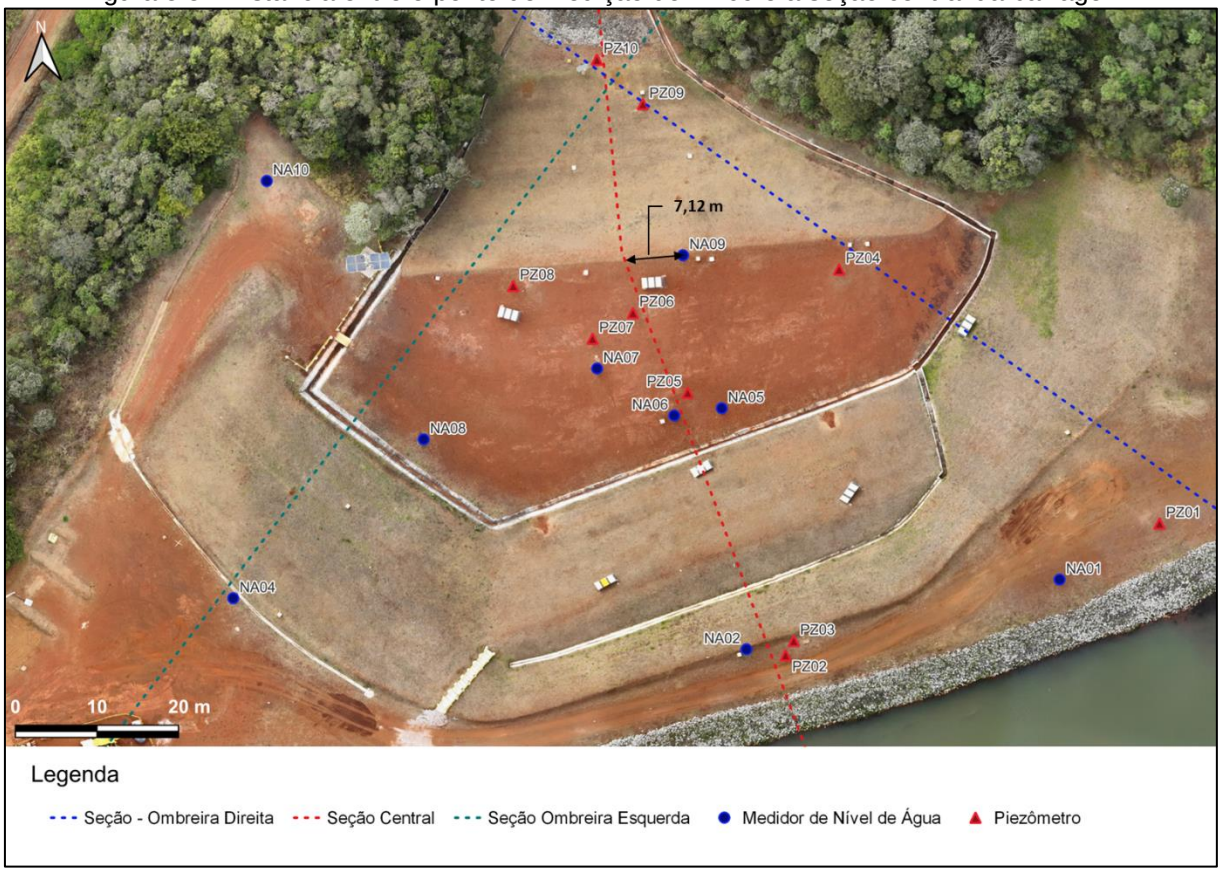
Fonte: Autor (2025)

Quanto ao comportamento seco do NA09, considerando sua profundidade e a interseção com o tapete drenante, verifica-se que este apresenta leituras incompatíveis com os demais instrumentos. A análise isolada desse dado poderia levar à conclusão equivocada de que o tapete drenante está seco, o que não é corroborado pelas observações realizadas na saída do dreno de pé, nem pelas leituras dos piezômetros localizados a montante (PZ07) e a jusante (PZ09 e PZ10).

Cabe destacar que, apesar da representação dos instrumentos em uma mesma seção, nem todos estão posicionados exatamente sobre o traçado dessa seção. Existem variações decorrentes da projeção dos instrumentos em relação ao plano da seção. Essa confiabilidade tende a diminuir à medida que aumenta a distância relativa entre o ponto de medição e o traçado da seção. No caso específico do NA09, verifica-se uma distância de 7,12 m em relação à seção, conforme Figura 5.5, o que pode resultar na projeção de dados registrados para uma região que não corresponde precisamente à área da seção. Por exemplo, é possível que o tapete drenante na área onde o NA09 está localizado apresente uma elevação inferior àquela observada na seção central. No entanto, uma conclusão definitiva requer investigação de campo.

Dessa forma, na análise da seção central (seção crítica), adotou-se um ajuste conservador para o traçado do nível freático, alinhando-o às leituras dos instrumentos a montante e a jusante do NA09, desconsiderando sua condição seca.

Figura 5.5 - Distância entre o ponto de medição do NA09 e a seção central da barragem.

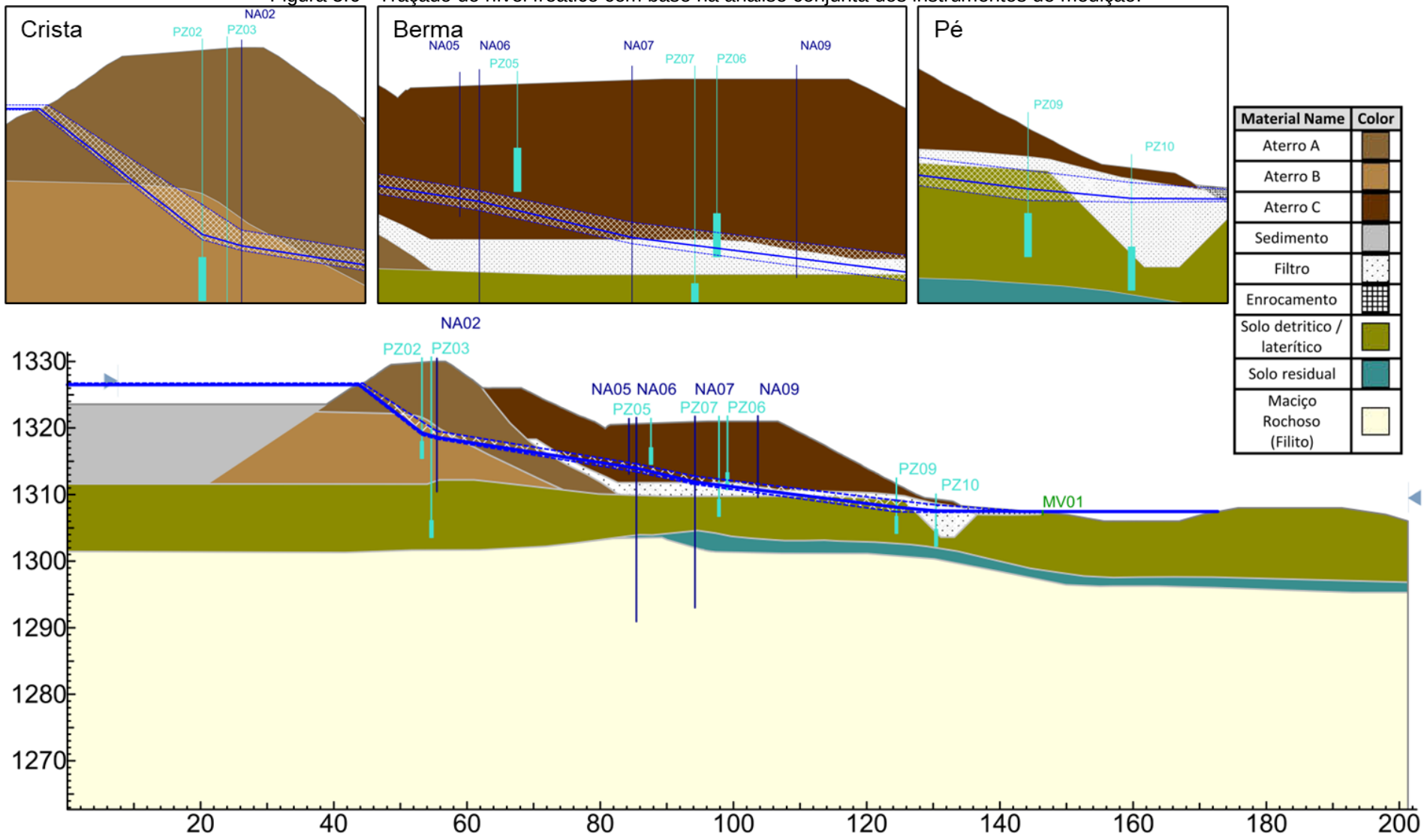


Fonte: Autor (2025)

Com base nas três análises realizadas, a seção instrumentada do nível freático da barragem estudo foi desenvolvida considerando, de forma integrada, as medições dos indicadores de nível de água e das poropressões no aterro. Além disso, foram incluídas as leituras dos piezômetros localizados no pé do talude, pois estes refletem o comportamento do nível freático na saída do dreno, situada na região final do aterro. A Figura 5.6 ilustra o traçado do nível freático resultante da análise conjunta dos instrumentos, que será utilizado para avaliar a calibração do modelo de percolação.

Ressalta-se que as leituras dos piezômetros instalados na fundação também foram consideradas na análise do modelo de percolação. No entanto, para facilitar a visualização, essas leituras não foram incluídas na representação gráfica da seção.

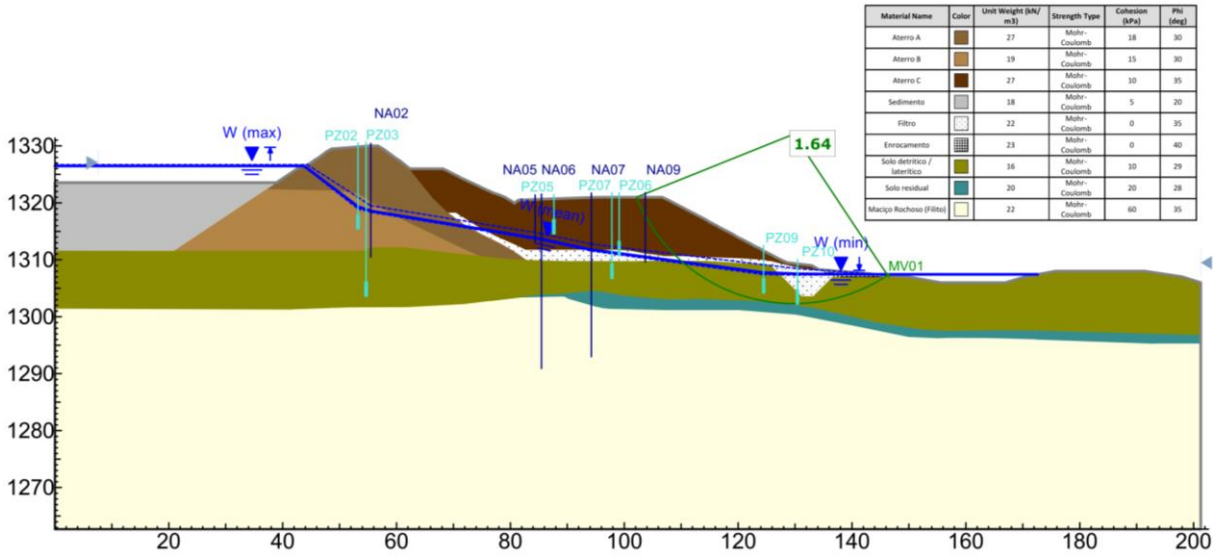
Figura 5.6 - Traçado do nível freático com base na análise conjunta dos instrumentos de medição.



Fonte: Autor (2025)

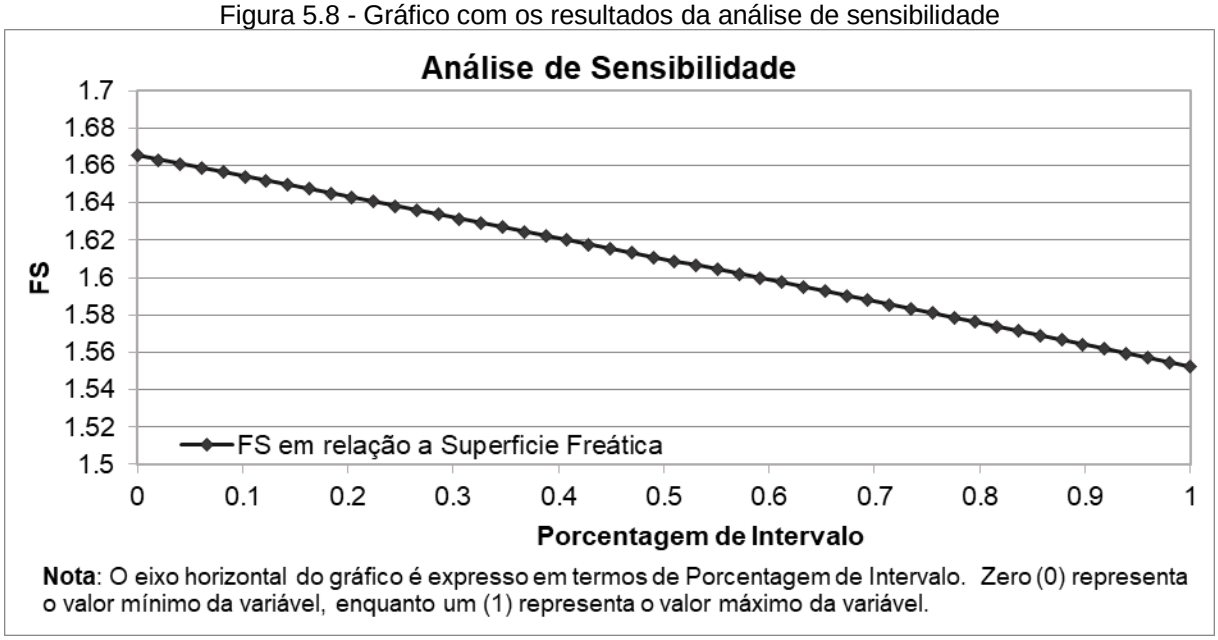
Ao realizar uma análise de sensibilidade com base na faixa freática obtida por meio da instrumentação, é possível avaliar a influência dessa variável no fator de segurança da estrutura. Para tal, foram determinadas as faixas de variação com limites correspondes aos valores máximos e mínimos registrados pelos instrumentos. Posteriormente, foi calculado pelo software a faixa média, considerando uma média normalizada de 0,2, próxima à média real. A distribuição adotada para a análise foi a distribuição normal. A Figura 3.27 apresenta os resultados do fator de segurança para a faixa freática média, enquanto a Figura 5.7 exibe um gráfico da variação do fator de segurança em função da porcentagem do intervalo da variável analisada.

Figura 5.7 - Fator de segurança da análise de sensibilidade para a freática média.



Fonte: Autor (2025)

Figura 5.8 - Gráfico com os resultados da análise de sensibilidade



Fonte: Autor (2025)

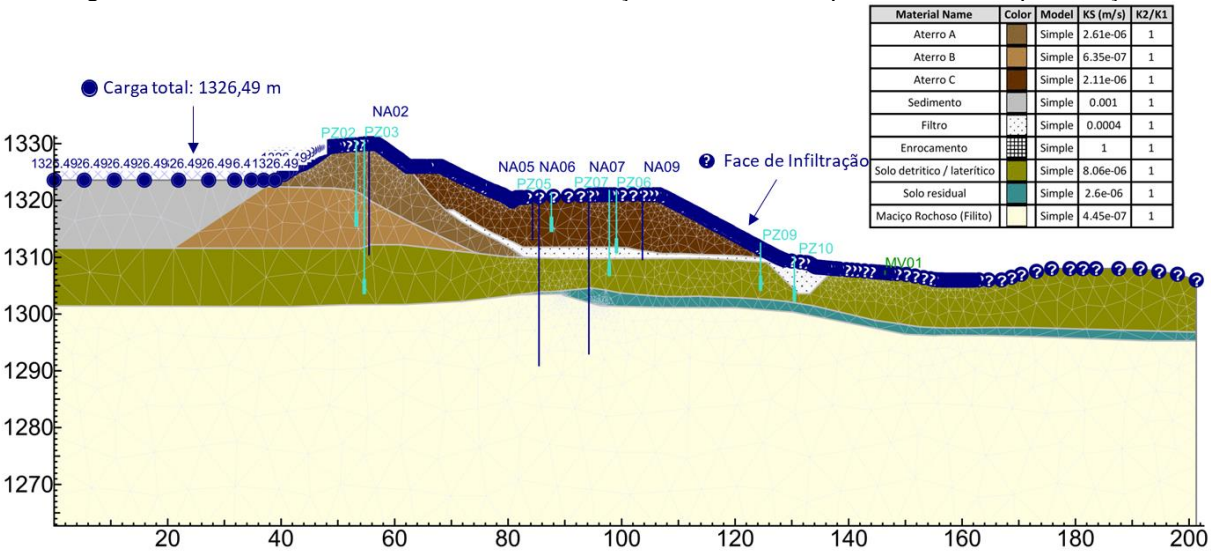
A análise de sensibilidade indica que, embora o fator de segurança diminua com o aumento da cota da freática, essa variação não compromete a estabilidade da estrutura, uma vez que os fatores de segurança não caem abaixo de 1,0. Os valores observados para os fatores de segurança, com base na freática medida pela instrumentação, permanecem superiores a 1,5, atendendo, portanto, aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 13.028/2024. Nesse contexto, conclui-se que os níveis de freática observados ao longo do histórico da barragem não representam risco à estabilidade da seção central (C-C').

Considerando essas evidências, conclui-se que as metodologias para elaboração de cartas de controle, que utilizam apenas os dados históricos de leituras e estabelecem níveis com base apenas nos dados amostrais disponíveis, não são adequadas. Isso ocorre porque esses níveis não representam riscos significativos para a segurança da barragem. Embora tais análises possam ser úteis para monitorar a variação no comportamento dos instrumentos e identificar saltos de leitura, elas não são aplicáveis para a avaliação da segurança estrutural da barragem.

5.2 MODELO DE PERCOLAÇÃO

O modelo de percolação da Barragem Estudo foi calibrado com base nos dados de instrumentação. Para isso, adotar-se-á um modelo inicial com permeabilidades médias, sem considerar anisotropia para nenhum dos materiais da seção. A malha utilizada é formada por elementos triangulares de 3 nós com condições de contorno montante de carga total correspondente ao nível médio do reservatório e condições de contorno jusante de face de infiltração, conforme mostrado na Figura 5.9. Observa-se que foi adotado a opção inerente do Slide2 *Improve Discretization Grading*, que aumenta a quantidade de elementos ao redor de segmentos pequenos, a fim de minimizar a formação de elementos malformados na malha. Com isso, o elemento do filtro apresenta uma densidade de malha maior, isso é preferível na análise de percolação uma vez que a expectativa é que o fluxo passe dentro desse elemento ou próximo a ele.

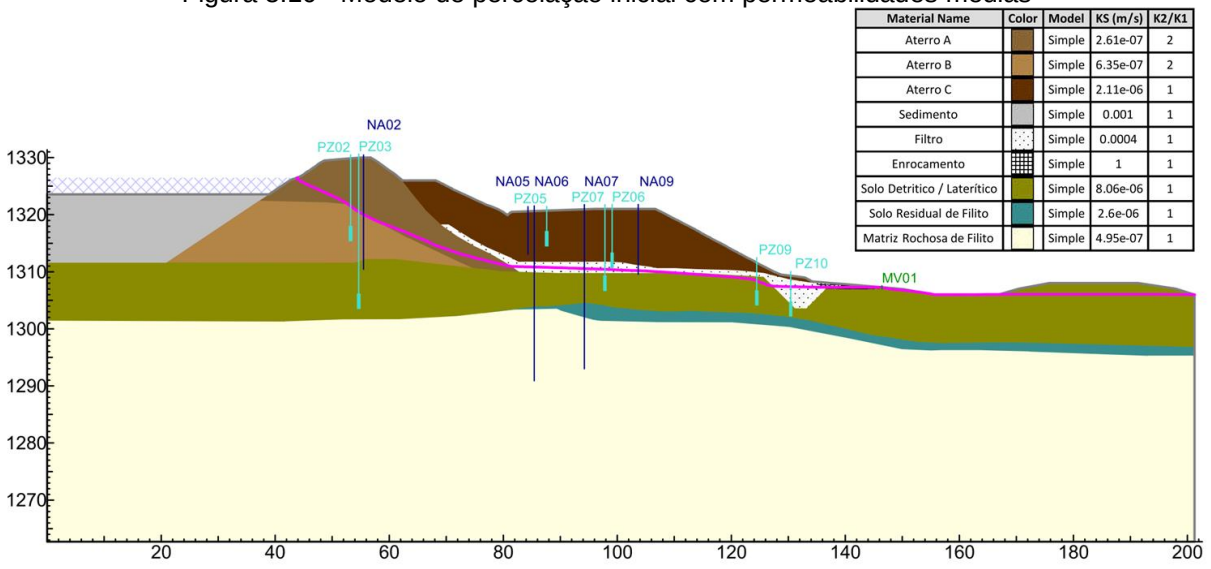
Figura 5.9 - Malha de elementos finitos e condições de contorno para análise de percolação



Fonte: Autor (2025)

A Figura 5.10 apresenta a linha freática encontrada para os parâmetros médios de permeabilidade adotada. Em rosa a linha freática obtida pelo SLIDE2, por definição a linha freática é definida para os pontos em que a carga piezométrica é igual a zero.

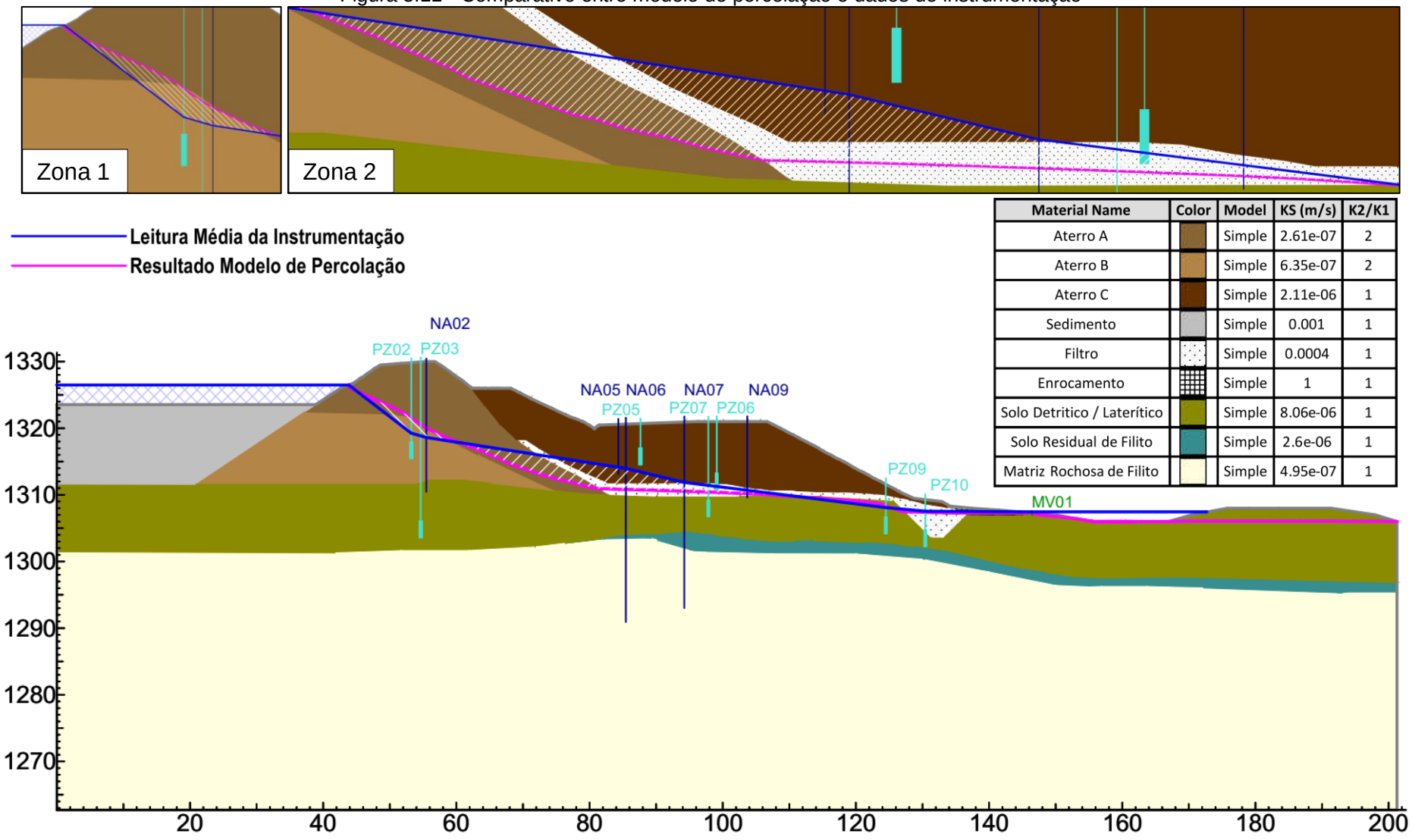
Figura 5.10 - Modelo de percolação inicial com permeabilidades médias



Fonte: Autor (2025)

Posteriormente, foi traçada na seção a freática média representativa da instrumentação, conforme item 5.1.4, resultando na Figura 5.11. Comparativamente observam-se duas zonas de diferença do resultado da percolação em relação ao da instrumentação. Na primeira zona a freática obtida por elementos finitos apresenta-se acima da freática medida pela instrumentação, enquanto na segunda zona o contrário.

Figura 5.11 - Comparativo entre modelo de percolação e dados de instrumentação



Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1
Aterro A		Simple	2.61e-07	2
Aterro B		Simple	6.35e-07	2
Aterro C		Simple	2.11e-06	1
Sedimento		Simple	0.001	1
Filtro		Simple	0.0004	1
Enrocamento		Simple	1	1
Solo Detritico / Laterítico		Simple	8.06e-06	1
Solo Residual de Filito		Simple	2.6e-06	1
Matriz Rochosa de Filito		Simple	4.95e-07	1

Fonte: Autor (2025)

A adoção da leitura média como referência de condição normal da estrutura se dá uma vez que foi compatibilizado as leituras conforme item 4.3.2. Para casos em que os dados de monitoramento não se apresentem compatibilizados para uma única base topográfica, entende-se que a média das leituras é afetada. Nesses casos, pode-se adotar leituras de instrumentação correspondente a um dia representativo da condição de operação normal. Critérios a serem estabelecidos para adoção desse dia são: tempo de estabilização do reservatório superior ao tempo de resposta da instrumentação, desconsiderar dias com saltos significativos de leitura e utilizar base de leituras coerentes com levantamento topográfico utilizado pela seção do modelo de percolação.

Considerando as zonas de discrepâncias do resultado de percolação em relação à média de leitura, a calibração do modelo ocorreu em duas etapas correspondentes a cada zona. As etapas serão sucessivas, de modo que o resultado de calibração da etapa 1 será a partida da etapa 2. Por fim, será apresentada uma etapa conjunta com comentários a respeito do resultado em relação a Barragem Estudo.

5.2.1 **Calibração em relação a Zona 1**

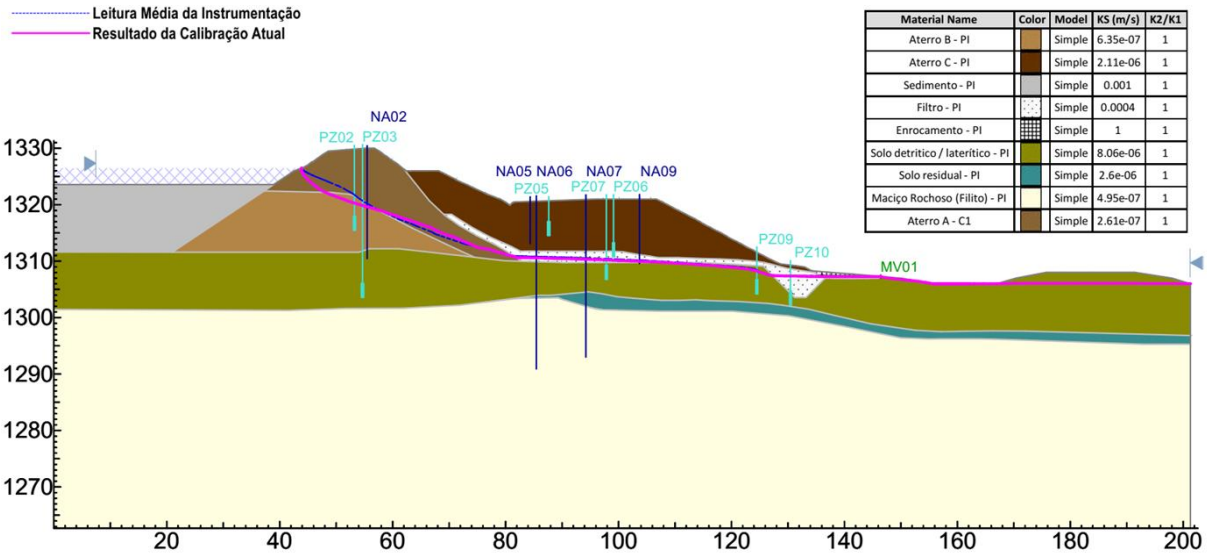
Considerando o comportamento da linha freática do modelo de percolação, acima da experimentada pela instrumentação, entende-se que a permeabilidade nessa região é maior que a adotada para o modelo inicial. Dessa forma, a primeira calibração consiste em um cenário em que a permeabilidade do Aterro A apresenta uma diminuição em 10 vezes, como apresentado na Tabela 5.1. Observa-se que, o valor da calibração encontra-se dentro da faixa de valores encontrada nos ensaios, conforme citado no item 4.2.2. Essa calibração resultou em uma linha freática em elevações menores. Conforme o resultado apresentado na Figura 5.12.

Tabela 5.1 - Calibração C1

Calibração C1		Faixa de Permeabilidade	
Material	Permeabilidade	Máximo	Mínimo
Aterro A	2,61E-06 → 2,61E-07	4,10E-05	3,48E-09

Fonte: Autor (2025)

Figura 5.12 - Resultado Calibração 1: com foco na zona 1



Fonte: Autor (2025)

5.2.2 **Calibração em relação a Zona 2**

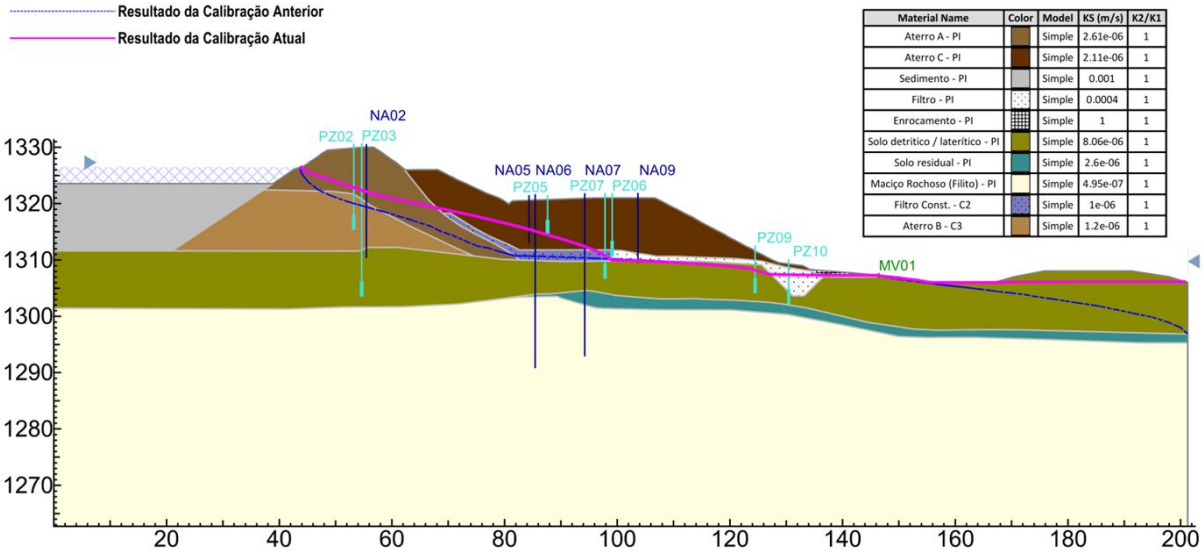
Considerando a zona 2, zona em que a superfície freática e piezométrica medida estão acima do tapete drenante, até a região do PZ06. Dessa forma, os dados de instrumentação expressam uma incapacidade de parte do sistema de drenagem de conduzir o fluxo de água internamente. Pelas leituras registradas, o sistema de drenagem trabalha afogado até a região do NA07. Para a compatibilização dos resultados de percolação com as leituras da instrumentação, foi considerado parte do sistema de drenagem com permeabilidade inferior ao adotado em projeto a fim de compatibilizar o resultado do modelo com os dados medidos in situ, a região do PZ06 foi estabelecida como divisão entre as regiões de condição normal e deficiente. O resultado dessa calibração encontra-se na Figura 5.13.

Tabela 5.2 - Calibração C2

Calibração C2	
Material	Permeabilidade
Filtro com Deficiência Construtiva	1E-06

Fonte: Autor (2025)

Figura 5.13 - Resultado Calibração 2: com foco na zona 2



Fonte: Autor (2025)

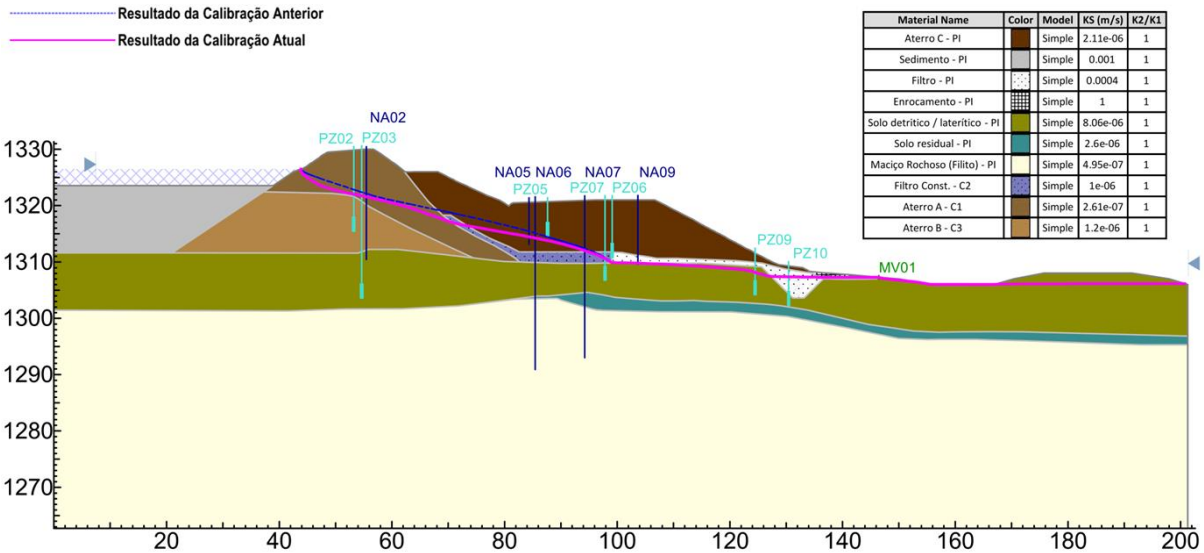
Observa-se que, com a diminuição de parte da capacidade drenante do sistema de drenagem interna, a freática na zona 1 voltou a apresentar uma elevação acima do medido pelos instrumentos. A fim de compatibilizar essa região, sem prejuízo para a calibração da zona 2, foi diminuída a permeabilidade do Aterro B assim como realizado no Aterro A. O resultando da calibração é apresentando na Figura 5.14.

Tabela 5.3 - Calibração C3

Calibração C3		Faixa de Permeabilidade	
Material	Permeabilidade	Máximo	Mínimo
Aterro B	2,61E-6 → 1,2E-06	1,87E-06	5,76E-08

Fonte: Autor (2025)

Figura 5.14 - Resultado da Calibração 3: com foco geral



Fonte: Autor (2025)

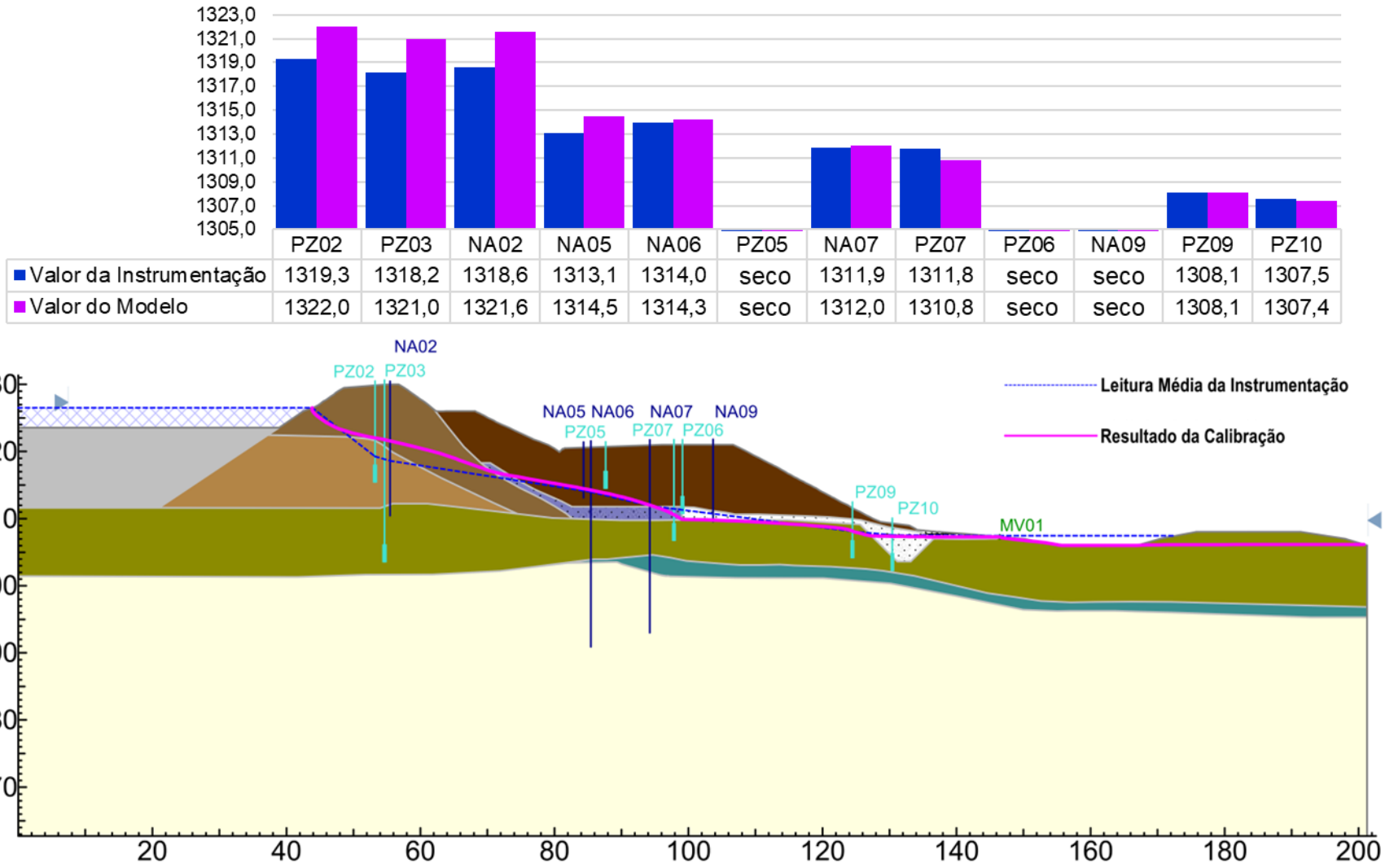
A Figura 5.15 apresenta o resultado da calibração, em que se pode perceber que, o resultado de percolação foi mais coerente com o resultado da instrumentação, contudo, ainda apresenta zonas de divergências, especialmente na região abaixo da crista da Barragem Estudo.

A Tabela 5.4 apresenta as permeabilidades adotadas para cada material após o processo de calibração, com a segmentação do material de filtro. Acrescido a essas informações, essa tabela apresenta os parâmetros de resistência apresentados no item 4.2. Observa-se que os materiais de filtro apesar de apresentar parâmetros de permeabilidade diferentes, apresentam parâmetros de resistência inalterados.

Tabela 5.4 - Parâmetros de permeabilidade adotados no modelo após calibração

Cor	Material	γ (kN/m³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k (m/s)
	Aterro A	27	18	30	$2{,}61 \times 10^{-7}$
	Aterro B	19	15	30	$1{,}2 \times 10^{-6}$
	Aterro C	27	10	35	$2{,}11 \times 10^{-6}$
	Maciço Rochoso (Filito)	22	60	35	$4{,}48 \times 10^{-7}$
	Filtro	21	0	35	4×10^{-4}
	Filtro D.C.	21	0	35	1×10^{-6}
	Enrocamento	23	0	40	1
	Sedimento	18	5	20	1×10^{-3}
	Solo detritico / laterítico	16	10	29	$8{,}14 \times 10^{-6}$
	Solo Residual de Filito	20	20	28	$2{,}60 \times 10^{-6}$

Figura 5.15 - Resultado Calibração Final



	PZ02	PZ03	NA02	NA05	NA06	PZ05	NA07	PZ07	PZ06	NA09	PZ09	PZ10
Valor da Instrumentação	1319,3	1318,2	1318,6	1313,1	1314,0	seco	1311,9	1311,8	seco	seco	1308,1	1307,5
Valor do Modelo	1322,0	1321,0	1321,6	1314,5	1314,3	seco	1312,0	1310,8	seco	seco	1308,1	1307,4

Fonte: Autor (2025)

5.2.3 **Considerações a respeito da calibração final**

A linha freática obtida por meio do modelo de percolação calibrado apresenta zonas de convergência e pequenas áreas de divergência em relação aos valores medidos pela instrumentação, conforme ilustrado na Figura 5.15. É importante destacar que, em qualquer calibração, sempre haverá diferenças entre os resultados numéricos e experimentais, sendo indispensável validar os dados numéricos com as medições de campo. Nesse contexto, conclui-se que o modelo de percolação, de modo geral, apresenta resultados consistentes com os dados obtidos pela instrumentação.

Particularmente, a região de percolação próxima ao sistema de drenagem e à saída do fluxo de água demonstra uma significativa concordância com os valores registrados em campo, conforme evidenciado pela instrumentação. Como ilustrado na Figura 5.7, a superfície de ruptura associada ao fator de segurança mínimo atravessa o pé da barragem, correspondendo às zonas do PZ09 e PZ10. Assim, a calibração numérica nesta área é especialmente relevante, pois exerce influência direta sobre o fator de segurança. Conclui-se, portanto, que as respostas do modelo numérico nessa região são validadas pelos dados instrumentais, o que fortalece sua aplicação na análise de estabilidade da estrutura.

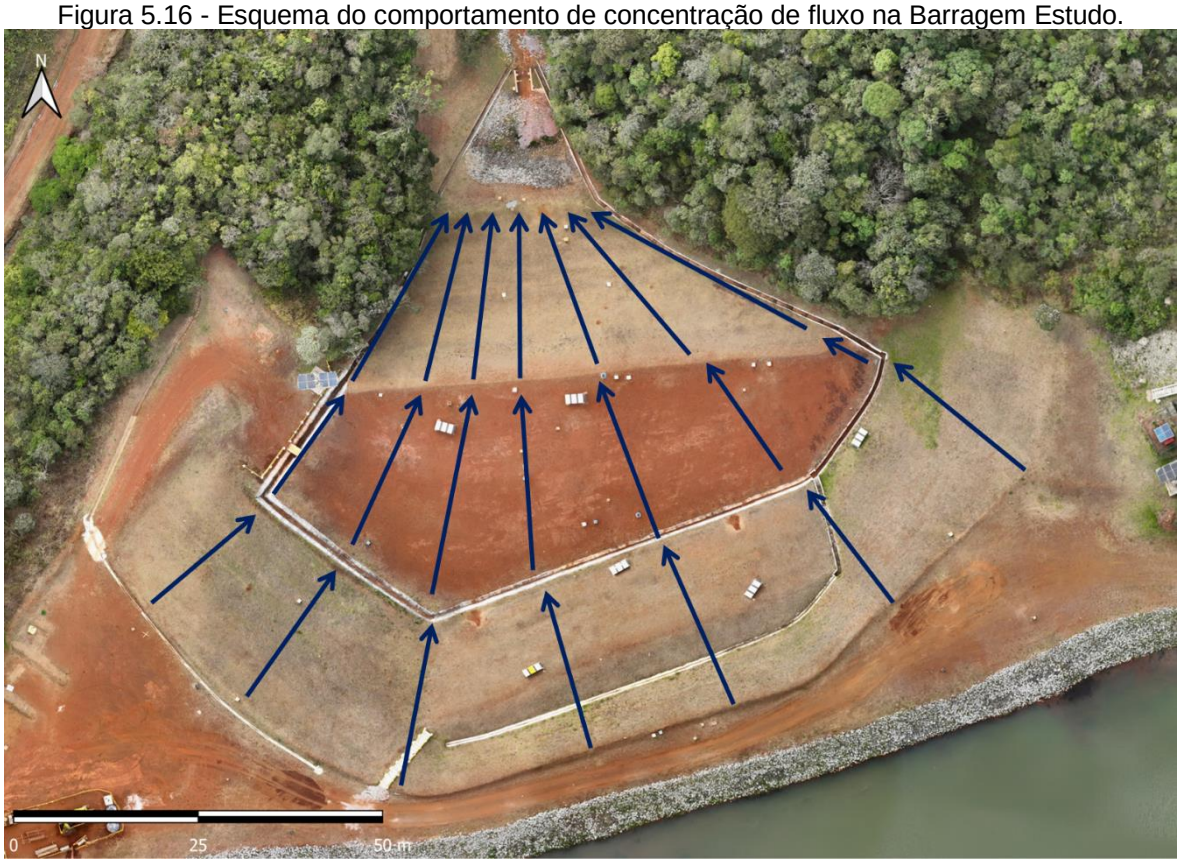
A divergência entre os resultados do modelo de percolação e as leituras da instrumentação pode ser atribuída tanto a fatores internos do modelo quanto a características específicas da estrutura. Nos parágrafos seguintes, serão discutidas as particularidades observadas na Barragem Estudo e as limitações associadas ao modelo de percolação adotado.

Uma das principais causas dessa discrepância está relacionada à dificuldade de representar um fluxo tridimensional (3D) em um modelo bidimensional (2D). Essa limitação é comum na maioria das modelagens de fluxo 2D, mas no caso da Barragem Estudo, ela é agravada devido à geometria afunilada a jusante da estrutura. Em particular, na região de encontro com a berma de equilíbrio, ocorre uma concentração maior de carga hidráulica, resultante da contribuição tridimensional do fluxo. Isso explica por que, nessa área, os níveis registrados pela instrumentação tendem a ser

superiores aos estimados pelo modelo de percolação 2D. A Figura 5.16 ilustra esquematicamente essa concentração de fluxo na estrutura.

Adicionalmente, destaca-se que, na região do NA07, PZ07 e PZ06, próximo a região central da drenagem interna da barragem, essa carga hidráulica é dissipada pelo filtro. Como resultado, há uma maior coerência entre os valores previstos pelo modelo de percolação e aqueles medidos em campo, indicando um alinhamento satisfatório entre os dados modelados e experimentais nessa área.

Figura 5.16 - Esquema do comportamento de concentração de fluxo na Barragem Estudo.



Fonte: Autor (2025)

A heterogeneidade das camadas de materiais constitui outro fator que compromete a precisão do modelo numérico. Para o mesmo material presente na seção, foram identificados valores de permeabilidade com elevada variabilidade. Um exemplo disso é o Aterro A, cuja permeabilidade varia entre 10-5 e 10-9 m/s, conforme Tabela 4.3. Além disso, a ausência de controle construtivo e de registros documentais relacionados à compactação dificulta a avaliação da anisotropia potencial do material.

Outro ponto relevante é a execução do desempenho deficiente da região inicial do sistema de drenagem interna, evidenciada pelas leituras obtidas nos instrumentos NA05, NA06 e NA07. Essa condição abre a possibilidade de falhas no processo

executivo que podem ter gerado áreas com desempenho funcional deficiente. Contudo, devido à geometria afunilada da barragem, que gera um comportamento de fluxo diferenciado no sistema de drenagem e na estrutura como um todo, quaisquer considerações definitivas sobre o projeto e seus componentes exigem uma análise de fluxo tridimensional (3D) na Barragem Estudo.

A fim de calibrar o modelo de percolação em relação a freática monitorada na estrutura, especialmente na região do NA005, foi estabelecida uma permeabilidade menor em parte do filtro/tapete drenante da estrutura. Essa região está em coloração roxa na Figura 5.15. Essa condição possibilitou ao modelo 2D expressar uma maior carga hidráulica na região de encontro do Aterro A e Berma, conforme observado através da instrumentação e esperado devido a sua geometria 3D.

Por fim, comenta-se sobre a execução do tapete drenante, destacando a possibilidade de falhas no processo executivo, o que poderia ter ocasionado regiões com deficiência no seu desempenho. Essa hipótese é evidenciada pelas leituras dos instrumentos NA05, NA06 e NA07.

5.3 ESTABELECIMENTO NÍVEIS DE CONTROLE

Neste subitem, são apresentados os resultados dos cenários de análise utilizados para o estabelecimento dos níveis de controle, conforme a metodologia descrita no item 4.6.3. Os parâmetros de resistência considerados nas análises de estabilidade estão listados na Tabela 4.2, enquanto os parâmetros de permeabilidade, definidos após a calibração do modelo, estão apresentados na Tabela 5.4.

Ressalta-se que parte dos instrumentos pertencentes ao sistema de monitoramento da Barragem Estudo não são contemplados pelas seções geológica-geotécnica, são eles: PZ11, PZ12, NA10 e NA03. Portando, não é possível aplicação da metodologia para definição de níveis de controle nesses casos. Além disso, o medidor de vazão, MV01, devido à natureza tridimensional do seu parâmetro de medida (volume em relação ao tempo) não ser relacionado diretamente através do modelo de percolação bidimensional das seções. Para esses instrumentos, serão adotados método de definição de níveis de controle baseado nas leituras históricas.

5.3.1 **Seção Central (C-C').**

A seguir, são descritas as análises de estabilidade realizadas na seção central da Barragem Estudo, considerando os cenários de nível de controle adotados neste dissertação. A Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 mostram os resultados das análises de percolação e estabilidade para os cenários correspondentes aos níveis de atenção, alerta e emergência, respectivamente. Por fim, a Figura 5.20 ilustra, de forma conjunta, os níveis de controle do modelo aplicados a essa seção.

Ao analisar os resultados de estabilidade e percolação dos cenários críticos, observa-se uma variação significativa da linha freática no interior do maciço da Barragem Estudo, em função da permeabilidade do sistema de drenagem interna, como era esperado. Apesar disso, o fator de segurança em relação à estabilidade não apresentou variações relevantes, sendo registrado, para o cenário de emergência, um valor mínimo de 1,49.

No entanto, ao considerar o comportamento das linhas freáticas nessas análises, verifica-se que, no cenário mais crítico avaliado — o de emergência —, a linha freática se aproxima da superfície do talude. Observa-se que qualquer infiltração descontrolada na superfície do talude compromete a sua estabilidade, aumentando a possibilidade de ocorrência de modos de falha, como erosão interna e piping. Com base nas zonas de atenção identificadas na Figura 4.25, que abrangem a região do pé e a crista da berma, foi quantificada a distância da linha freática em relação a essas áreas sensíveis. No caso do cenário de emergência, constatou-se que a linha freática do modelo está aproximadamente a 2 metros da crista da berma e a 1 metro do pé do talude. A Tabela 5.5 apresenta uma síntese desses resultados

Tabela 5.5 - Síntese dos cenários de análise e resultados correspondentes

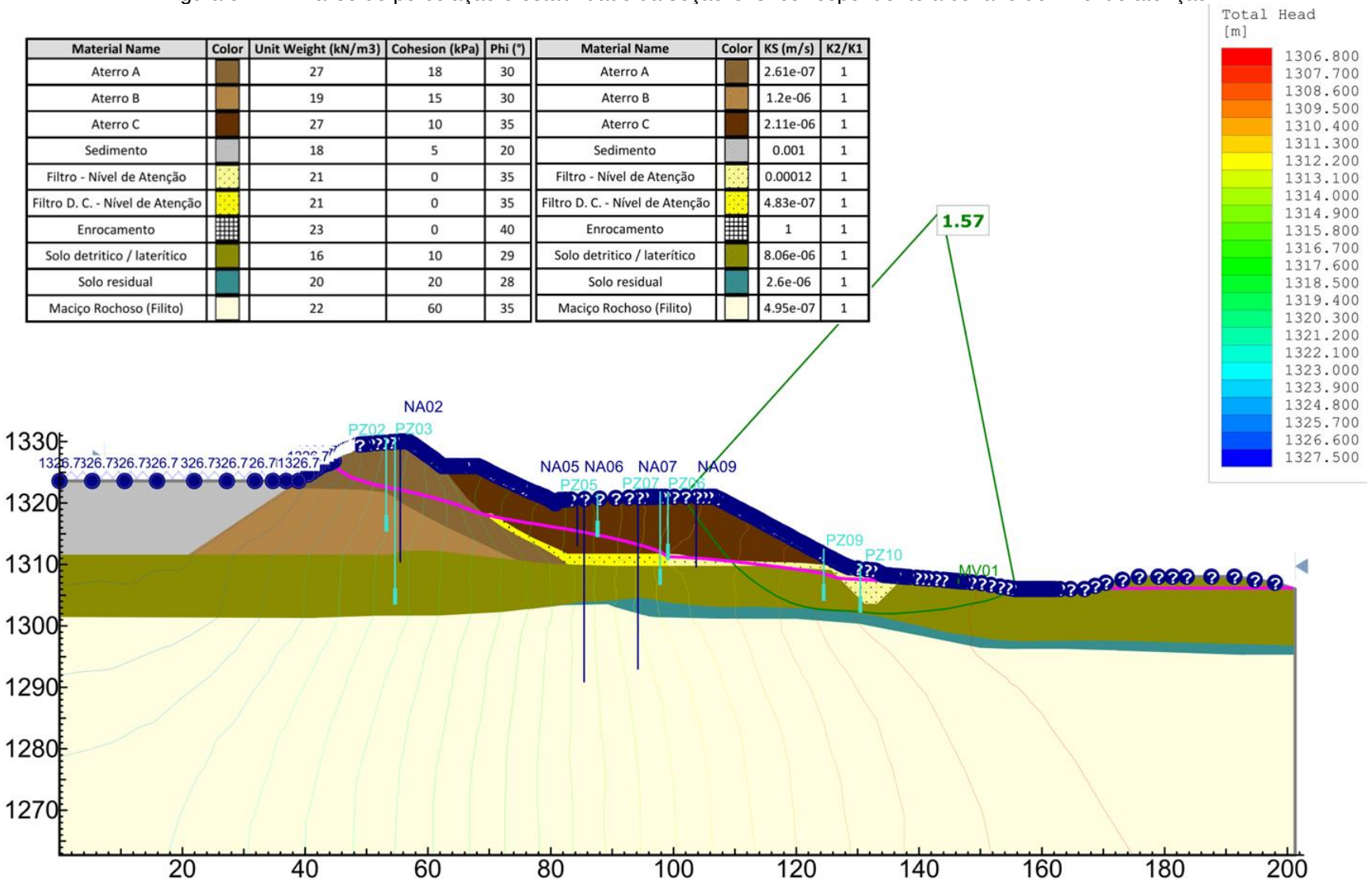
Cenários de Nível	Características				Resultados		
	Colmatação	NA Res. (m)	Borda Livre (m)	Dif. PMP (m)	FS Est.	Dist. Superfície - Zona 1 (m)	Dist. Superfície - Zona 2 (m)
Atenção	75%	1326,7	2,8	1,28	1,57	2,06	1,01
Alerta	85%	1327,34	2,16	0,64	1,54	3,23	1,67
Emergência	95%	1327,98	1,52	0	1,49	3,87	1,87

Fonte: Autor (2025)

Figura 5.17 - Análise de percolação e estabilidade da seção C-C’ correspondente a cenário de nível de atenção

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Cohesion (kPa)	Phi (°)
Aterro A		27	18	30
Aterro B		19	15	30
Aterro C		27	10	35
Sedimento		18	5	20
Filtro - Nível de Atenção		21	0	35
Filtro D. C. - Nível de Atenção		21	0	35
Enrocamento		23	0	40
Solo detritico / laterítico		16	10	29
Solo residual		20	20	28
Maciço Rochoso (Filito)		22	60	35

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1
Aterro A		2.61e-07	1
Aterro B		1.2e-06	1
Aterro C		2.11e-06	1
Sedimento		0.001	1
Filtro - Nível de Atenção		0.00012	1
Filtro D. C. - Nível de Atenção		4.83e-07	1
Enrocamento		1	1
Solo detritico / laterítico		8.06e-06	1
Solo residual		2.6e-06	1
Maciço Rochoso (Filito)		4.95e-07	1

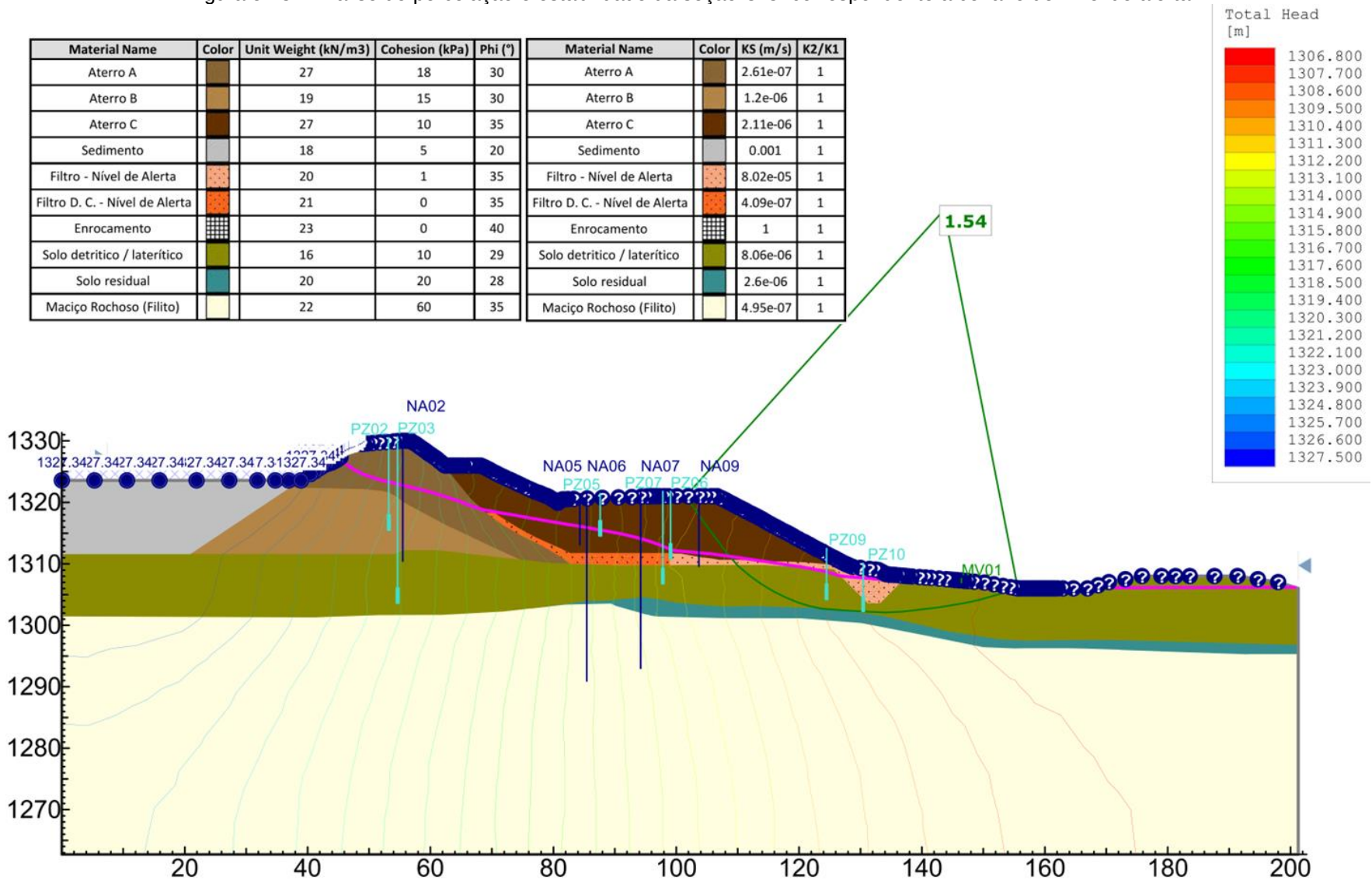


Fonte: Autor (2025)

Figura 5.18 - Análise de percolação e estabilidade da seção C-C’ correspondente a cenário de nível de alerta

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Cohesion (kPa)	Phi (°)
Aterro A		27	18	30
Aterro B		19	15	30
Aterro C		27	10	35
Sedimento		18	5	20
Filtro - Nível de Alerta		20	1	35
Filtro D. C. - Nível de Alerta		21	0	35
Enrocamento		23	0	40
Solo detritico / laterítico		16	10	29
Solo residual		20	20	28
Maciço Rochoso (Filito)		22	60	35

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1
Aterro A		2.61e-07	1
Aterro B		1.2e-06	1
Aterro C		2.11e-06	1
Sedimento		0.001	1
Filtro - Nível de Alerta		8.02e-05	1
Filtro D. C. - Nível de Alerta		4.09e-07	1
Enrocamento		1	1
Solo detritico / laterítico		8.06e-06	1
Solo residual		2.6e-06	1
Maciço Rochoso (Filito)		4.95e-07	1

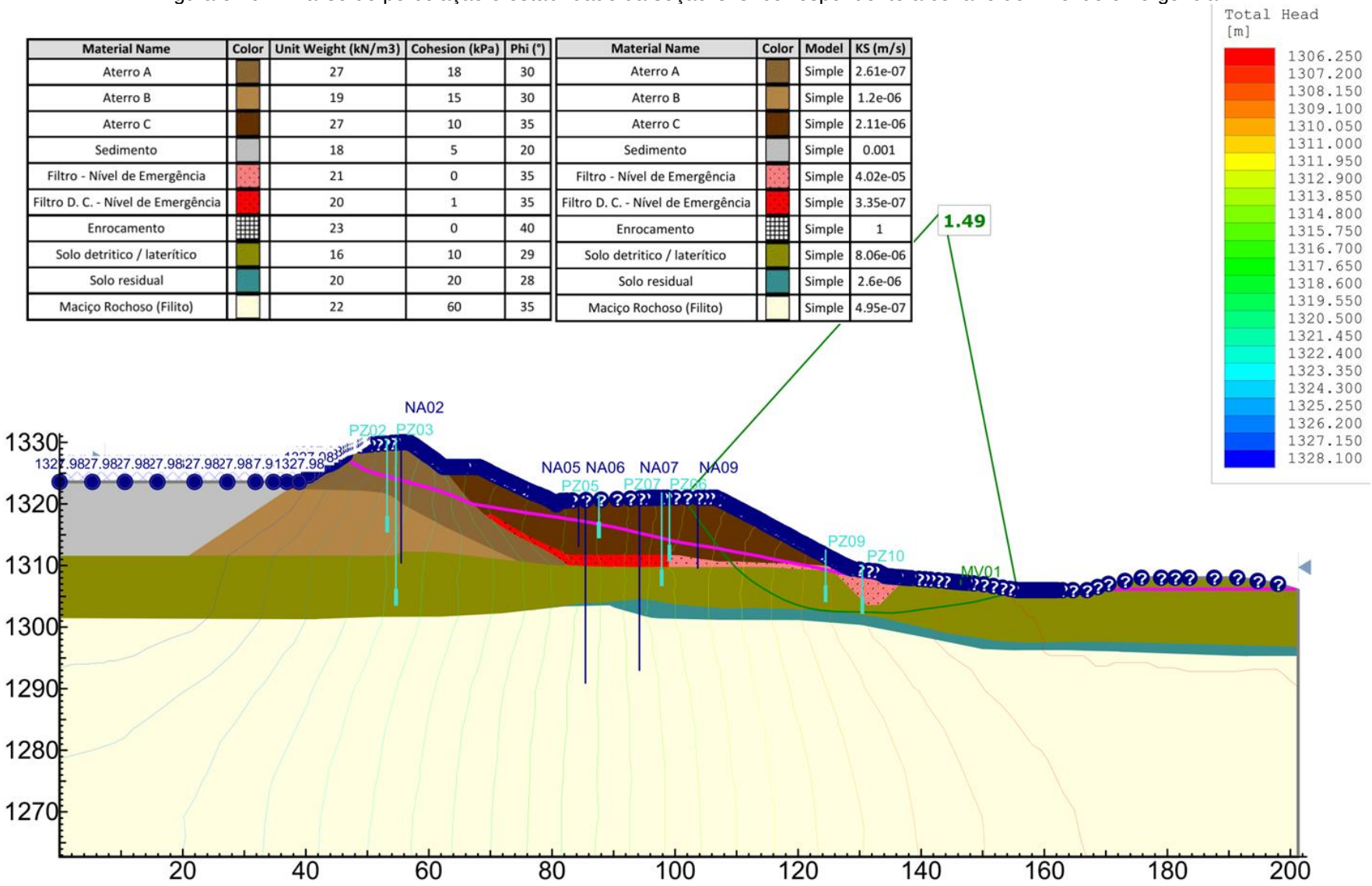


Fonte: Autor (2025)

Figura 5.19 - Análise de percolação e estabilidade da seção C-C' correspondente a cenário de nível de emergência

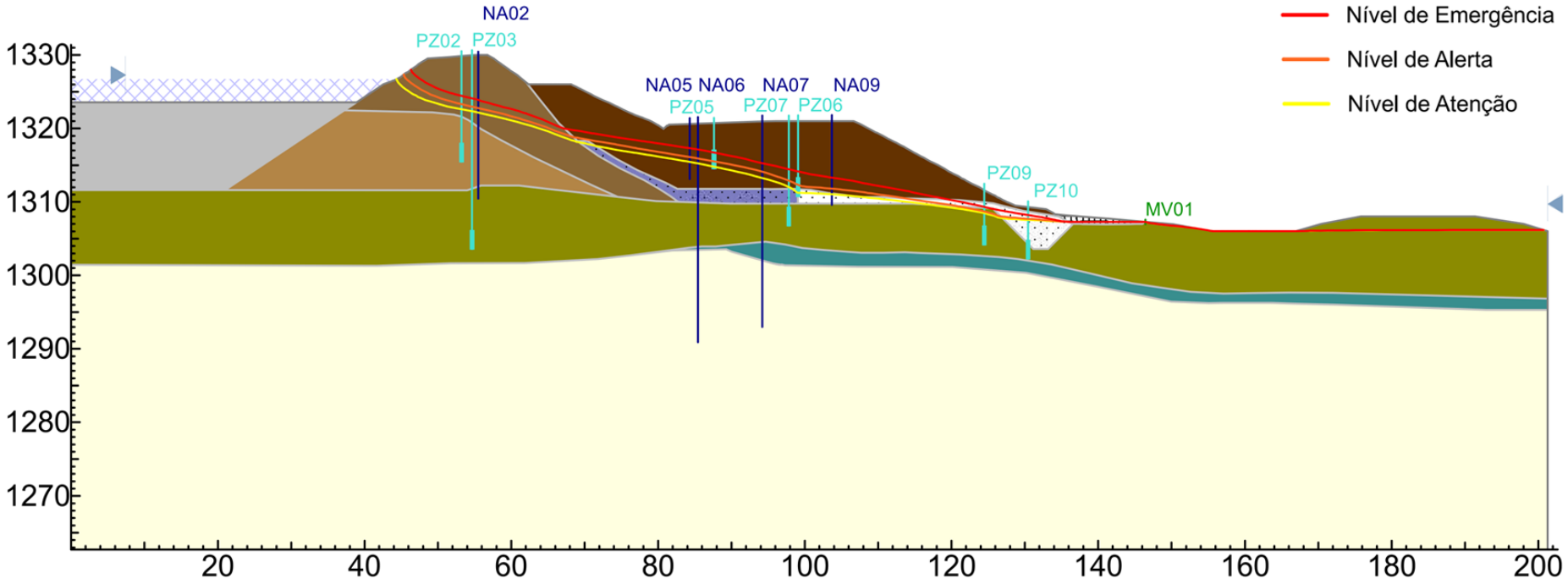
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Cohesion (kPa)	Phi (°)
Aterro A		27	18	30
Aterro B		19	15	30
Aterro C		27	10	35
Sedimento		18	5	20
Filtro - Nível de Emergência		21	0	35
Filtro D. C. - Nível de Emergência		20	1	35
Enrocamento		23	0	40
Solo detritico / laterítico		16	10	29
Solo residual		20	20	28
Maciço Rochoso (Filito)		22	60	35

Material Name	Color	Model	KS (m/s)
Aterro A		Simple	2.61e-07
Aterro B		Simple	1.2e-06
Aterro C		Simple	2.11e-06
Sedimento		Simple	0.001
Filtro - Nível de Emergência		Simple	4.02e-05
Filtro D. C. - Nível de Emergência		Simple	3.35e-07
Enrocamento		Simple	1
Solo detritico / laterítico		Simple	8.06e-06
Solo residual		Simple	2.6e-06
Maciço Rochoso (Filito)		Simple	4.95e-07



Fonte: Autor (2025)

Figura 5.20 - Seção central instrumentada com níveis de controles obtidos por percolação



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 5.6 apresenta os valores de níveis piezométricos ou freáticos para aos instrumentos da seção central (C-C'). Além disso, a mesma tabela compara os níveis de atenção em relação a leitura máxima de cada instrumento, destacando os níveis de atenção inferiores a leitura máxima histórica correspondente do instrumento.

Tabela 5.6 - Nível de controle obtidos por percolação e leitura máxima histórica para cada instrumento

Instrumento	Níveis obtidos através do modelo do SLIDE2			Leitura Máxima Histórica
	Nível de Atenção	Nível de Alerta	Nível de Emergência	
PZ02	1322,60	1323,30	1324,44	1320,98
PZ03	1322,31	1322,96	1324,09	1320,09
NA02	1322,14	1322,77	1323,87	1319,51
NA05	1315,43	1316,10	1317,24	1313,14
NA06	1315,23	1315,90	1317,12	1314,60
PZ05	1314,79	1315,51	1316,71	1315,00
NA07	1313,24	1314,09	1315,26	1312,76
PZ07	1312,02	1312,87	1314,44	1311,92
PZ06	1311,23	1312,32	1314,13	-
NA09	1311,03	1311,80	1313,30	-
PZ09	1308,48	1308,68	1309,34	1309,13
PZ10	1307,54	1307,69	1308,22	1308,45

Fonte: Autor (2025)

Com o objetivo de evitar a definição de níveis de controle que excedam as condições de leitura de cada instrumento, considera-se que, em situações em que o nível de atenção obtido na análise esteja acima dos resultados registrados pela instrumentação, foi adotada a leitura máxima histórica como nível de atenção. Essa abordagem, conforme descrito na metodologia do item 4.6.3, permite a detecção de anomalias e mudanças em incrementos menores, possibilitando a emissão de alertas antecipados sobre possíveis problemas antes que sua gravidade aumente. A Tabela 5.7 apresenta os níveis de controle adotados com base nos critérios estabelecidos.

Tabela 5.7 - Nível de controle obtidos por percolação e leitura máxima histórica para cada instrumento

Instrumento	Níveis críticos adotados		
	Nível de Atenção	Nível de Alerta	Nível de Emergência
PZ02	1320,98	1323,30	1324,44
PZ03	1320,09	1322,96	1324,09
NA02	1319,51	1322,77	1323,87

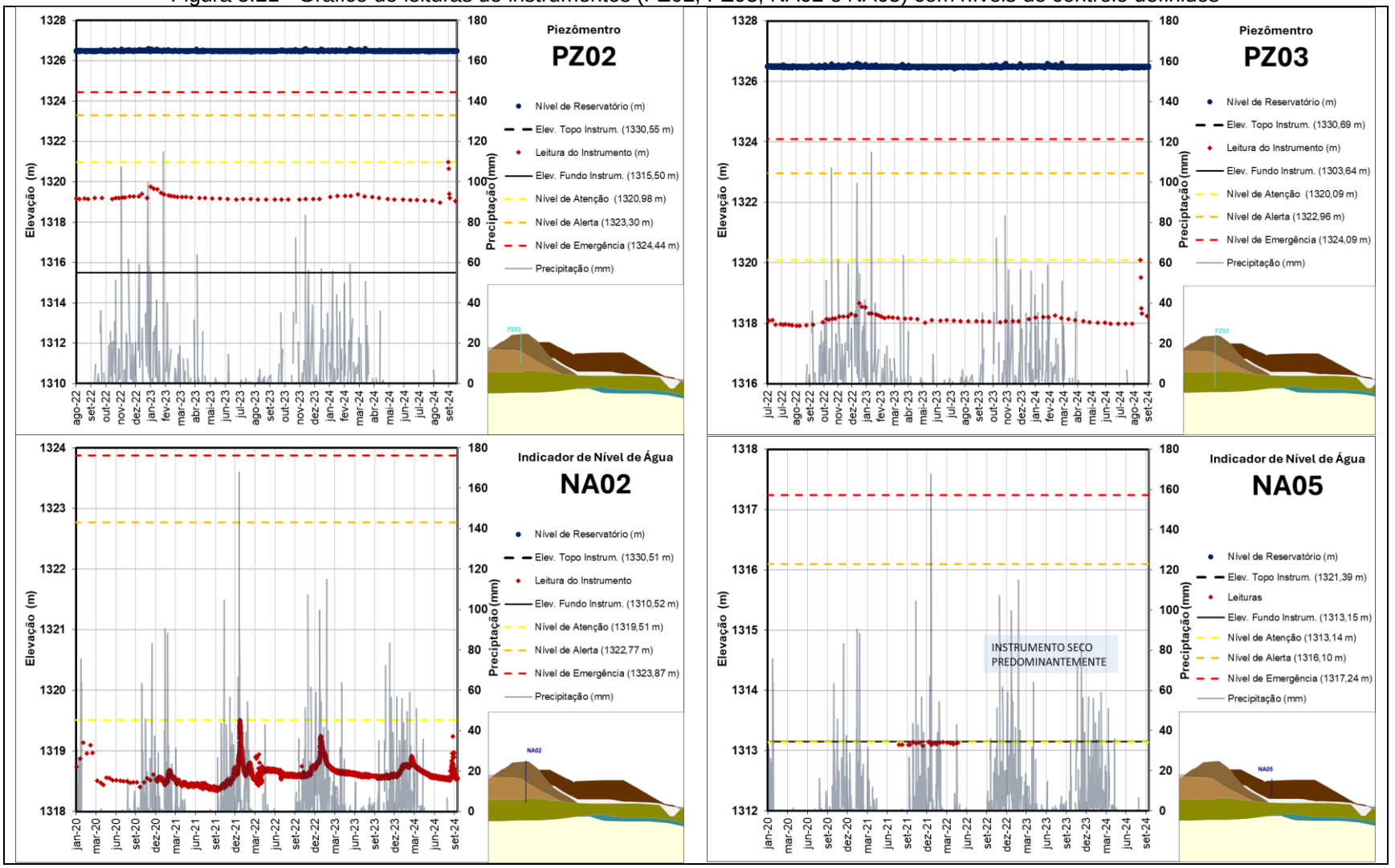
Instrumento	Níveis críticos adotados		
	Nível de Atenção	Nível de Alerta	Nível de Emergência
NA05	1313,14	1316,10	1317,24
NA06	1314,60	1315,90	1317,12
PZ05	1314,79	1315,51	1316,71
NA07	1312,76	1314,09	1315,26
PZ07	1311,92	1312,87	1314,44
PZ06	1311,23	1312,32	1314,13
NA09	1311,03	1311,80	1313,30
PZ09	1308,48	1308,68	1309,34
PZ10	1307,54	1307,69	1308,22

Fonte: Autor (2025)

A Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23, apresentam os gráficos dos instrumentos localizados na seção central (C-C'), juntamente com os níveis de controle definidos. Observa-se que, entre os instrumentos, o PZ09 e o PZ10 são os que mais frequentemente registram leituras históricas acima dos níveis de controle estabelecidos. Considerando que esses instrumentos estão posicionados na superfície de ruptura crítica da estrutura, a elevação da carga piezométrica nessa região está diretamente associada à redução do fator de segurança.

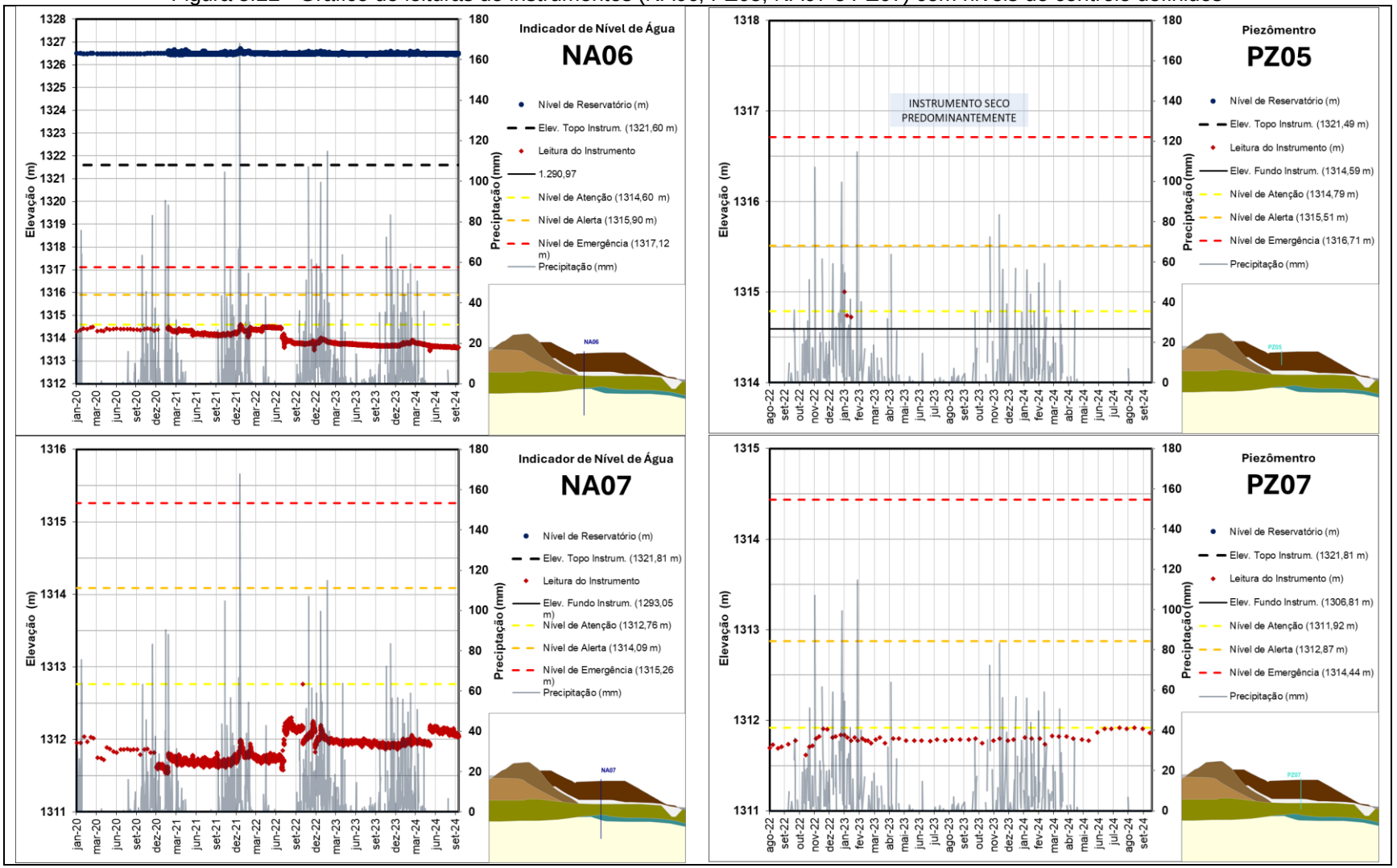
Dessa forma, os níveis de controle definidos para esses instrumentos, bem como para os demais, são considerados adequados, favorecendo a segurança da estrutura sem adoção de critérios excessivamente conservadores.

Figura 5.21 - Gráfico de leituras de instrumentos (PZ02, PZ03, NA02 e NA05) com níveis de controle definidos



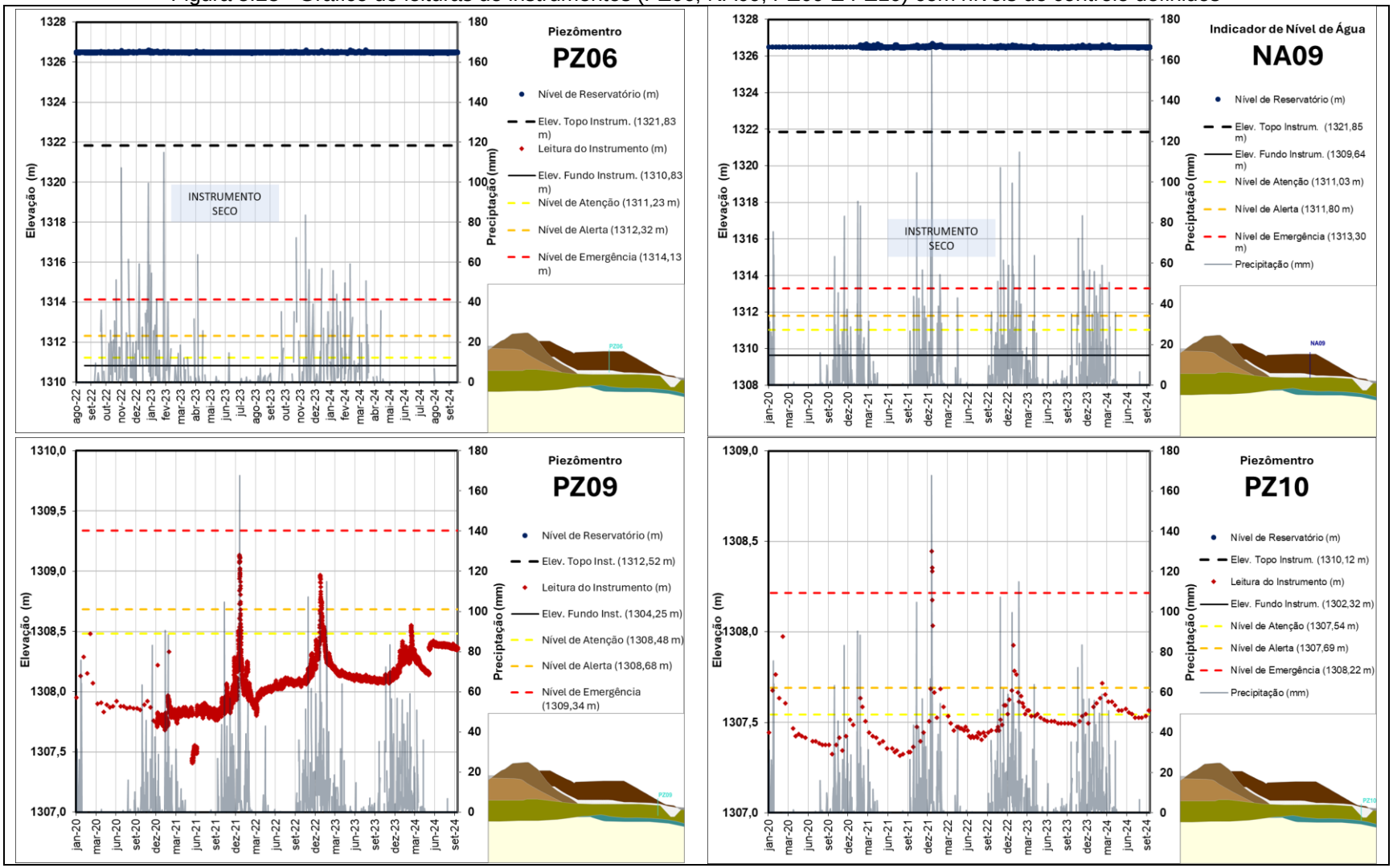
Fonte: Autor (2025)

Figura 5.22 - Gráfico de leituras de instrumentos (NA06, PZ05, NA07 e PZ07) com níveis de controle definidos



Fonte: Autor (2025)

Figura 5.23 - Gráfico de leituras de instrumentos (PZ06, NA09, PZ09 E PZ10) com níveis de controle definidos

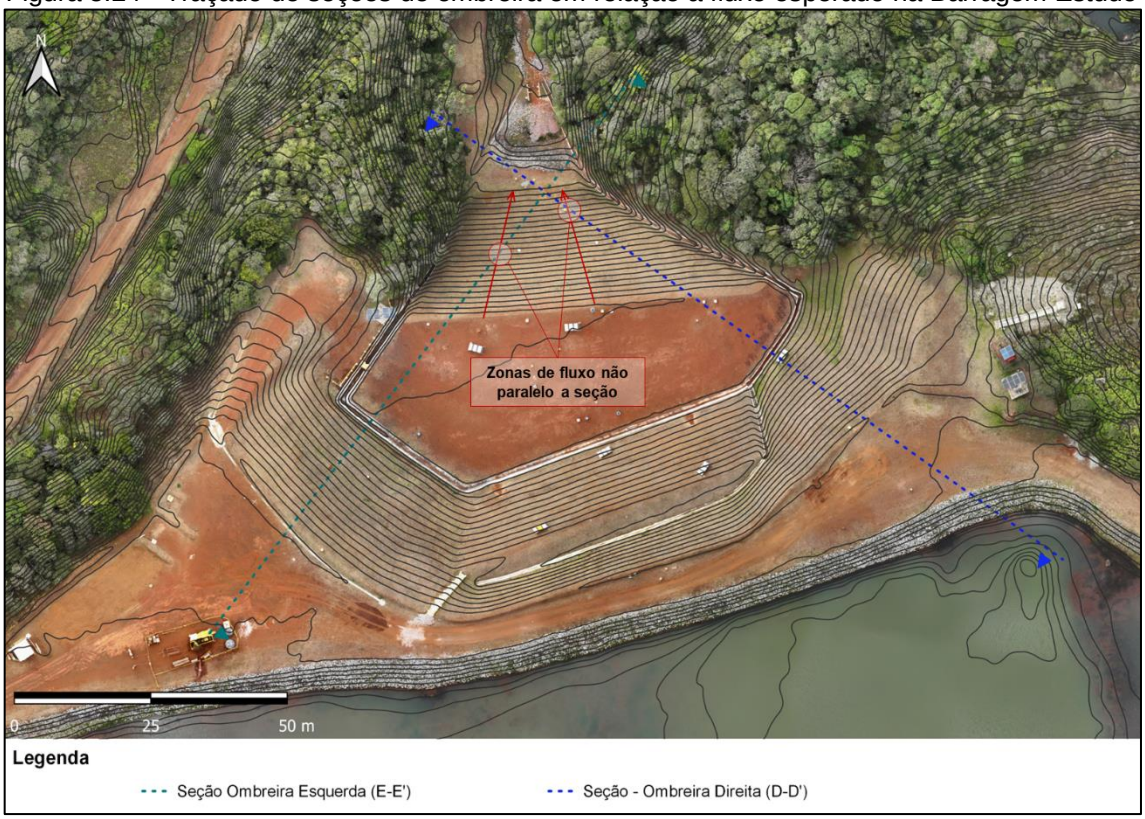


Fonte: Autor (2025)

5.3.2 **Seções de Ombreira**

As limitações apresentadas no item 5.2.3 , especialmente a respeito da característica de afunilamento da barragem e o comportamento do fluxo 3D, apresentado na Figura 5.16 , afetam diretamente o modelo de percolação das ombreiras e a confiabilidade dos seus resultados em relação ao esperado. Especialmente na região do talude da berma, o traçado da seção das ombreiras não são perpendiculares às curvas de nível topográficas. Por conseguinte, o fluxo esperado nessa região não é paralelo a seção e não está dentro do plano seu. A Figura 5.24 ilustra a interseção entre sentido do fluxo e seção.

Figura 5.24 - Traçado de seções de ombreira em relação a fluxo esperado na Barragem Estudo



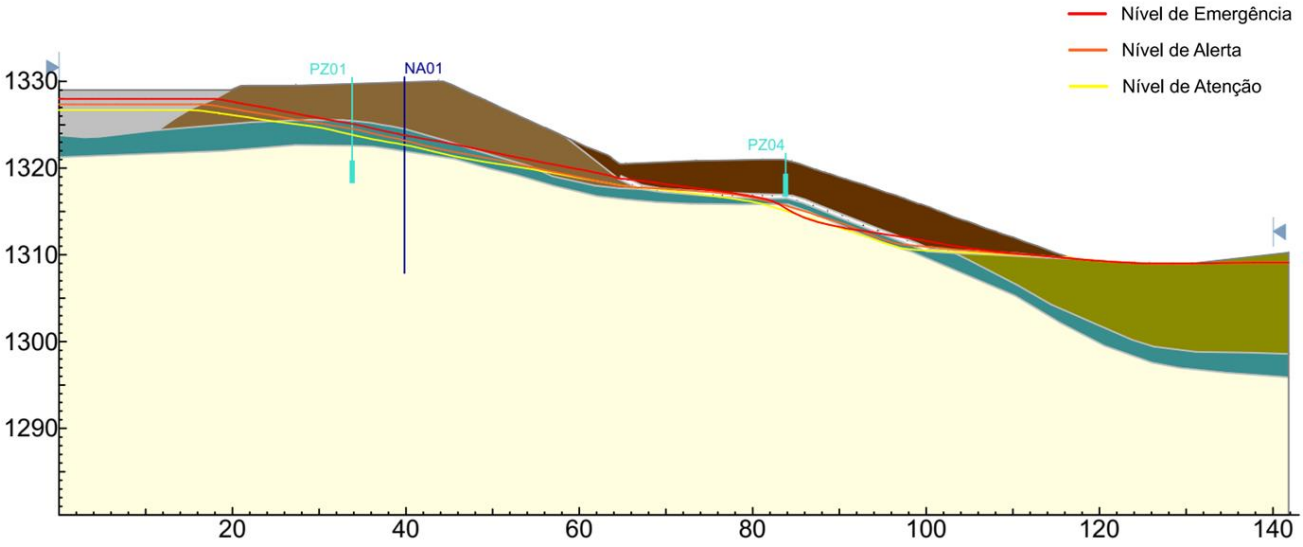
Fonte: Autor (2025)

Essa limitação, entretanto, é inerente do modelo 2D, uma vez que se propõe a expressar um fluxo em uma estrutura com tridimensionalidade geométrica significativa. Entende-se que para a seção de ombreira não ser perpendicular às curvas de nível, ela deve apresentar regiões segmentos retos conectados, o que por sua vez também trará limitações ao modelo. Portanto, considera-se que para o estudo coerente do fluxo dessa estrutura, especialmente nas regiões fora do centro da

estrutura, é necessária a aplicação de um modelo 3D de fluxo devidamente calibrado e estratificado conforme estrutura.

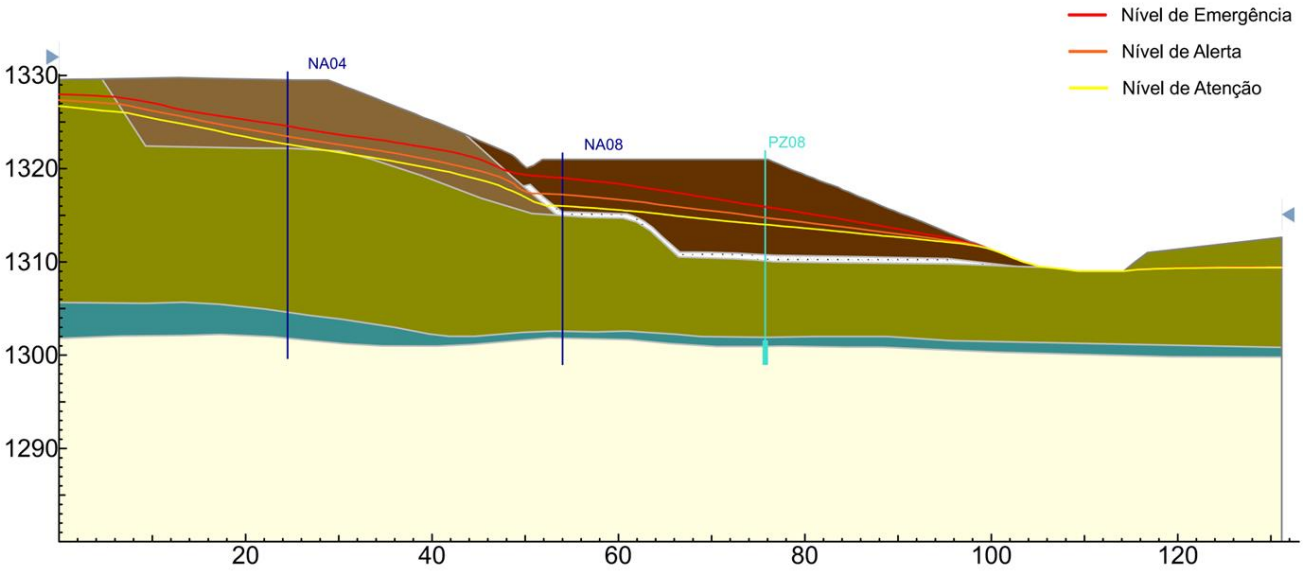
Considerando essas limitações, os resultados para as seções de ombreira são apresentados na Figura 5.25, Figura 5.26 e Tabela 5.8. Observa-se que, no caso do piezômetro PZ04, a freática nos cenários de níveis apresenta-se abaixo da cota de fundo do instrumento. Nesses casos, serão adotados como nível de atenção a cota de fundo do instrumento, uma vez que qualquer leitura do instrumento estaria acima da freática em cenário dos níveis de controle. A Figura 5.27 apresenta os gráficos dos instrumentos da ombreira, juntamente com os níveis de controle definidos.

Figura 5.25 - Seção Ombreira Direita D-D' com níveis de controles obtidos por percolação



Fonte: Autor (2025)

Figura 5.26 - Seção Ombreira Esquerda E-E' com níveis de controles obtidos por percolação



Fonte: Autor (2025)

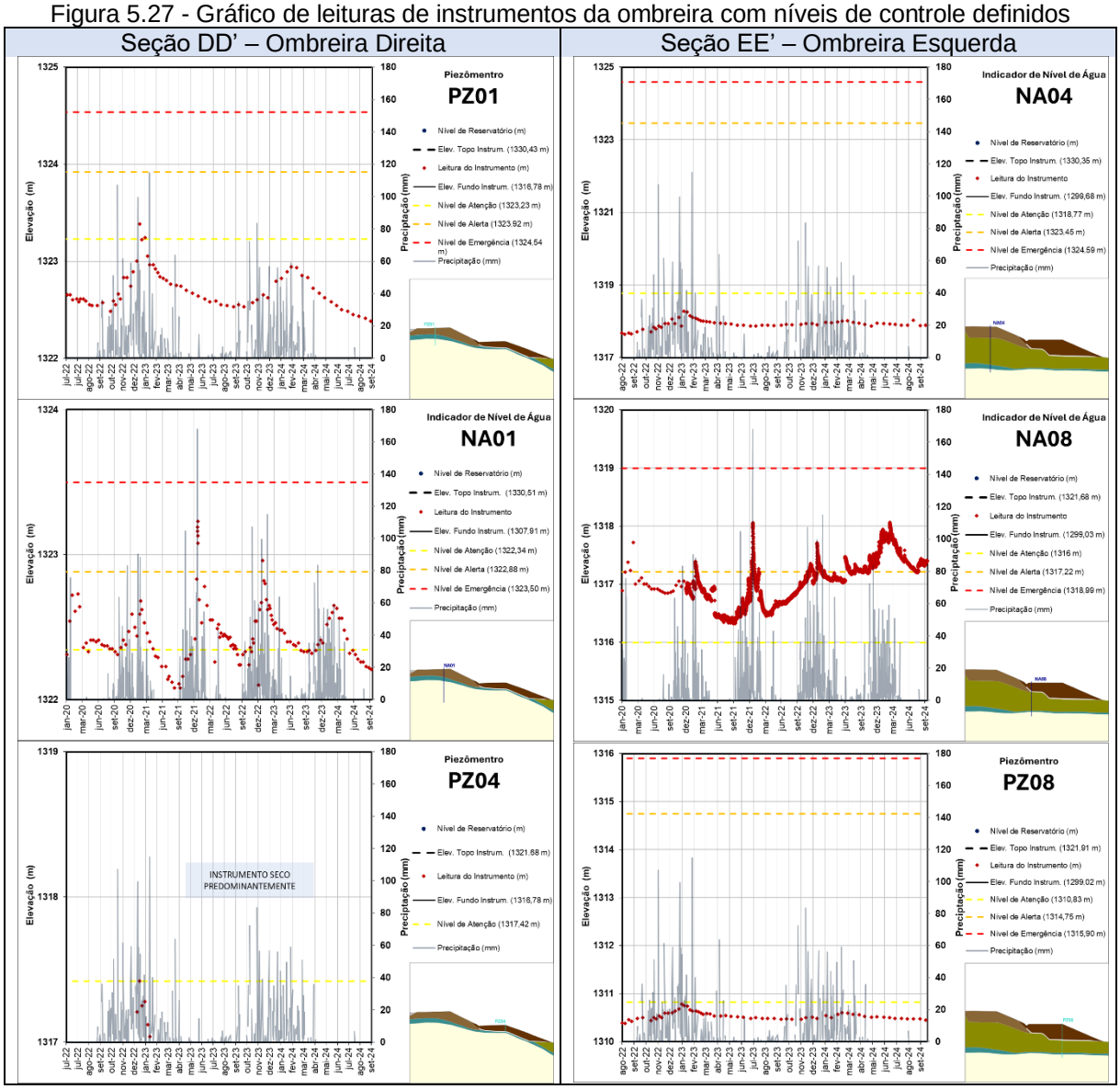
Tabela 5.8 - Nível de controle obtidos por percolação e níveis de controle adotados considerando critério de leitura máxima.

Instrumento – Seção	Níveis obtidos através do modelo do SLIDE2			Leitura Máxima Histórica	Níveis críticos adotados		
	Nível de Atenção	Nível de Alerta	Nível de Emergência		Nível de Atenção	Nível de Alerta	Nível de Emergência
PZ01 - Seção DD'	1323,35	1323,92	1324,54	1323,23	1323,23	1323,92	1324,54
NA01 - Seção DD'	1322,34	1322,88	1323,50	1323,23	1322,34	1322,88	1323,50
PZ04 - Seção DD'	-	-	-	1317,42	1317,42	-	-
NA04 - Seção EE'	1322,61	1323,45	1324,59	1318,77	1318,77	1323,45	1324,59
NA08 - Seção EE'	1316,00	1317,22	1318,99	1318,07	1316,00	1317,22	1318,99
PZ08 - Seção EE'	1314,01	1314,75	1315,90	1310,83	1310,83	1314,75	1315,90

(*) - Valor de nível de atenção correspondente a cota de fundo do instrumento.

Fonte: Autor (2025)

Figura 5.27 - Gráfico de leituras de instrumentos da ombreira com níveis de controle definidos



Fonte: Autor (2025)

5.3.3 **Demais instrumentações**

Parte dos instrumentos do sistema de monitoramento da Barragem Estudo não apresentam níveis de controle definidos por meio da análise de percolação e estabilidade apresentadas anteriormente. Para definição de níveis de controle desses instrumentos foi adotada metodologia estatística simples, a qual estabelece nível de atenção, alerta e emergência como sendo a média das leituras somada a duas vezes o desvio padrão, quatro vezes o desvio padrão e seis vezes o desvio padrão, respectivamente. Contudo, no caso dos instrumentos que não possuem relação direta com a estabilidade da estrutura adotou-se apenas o nível de atenção.

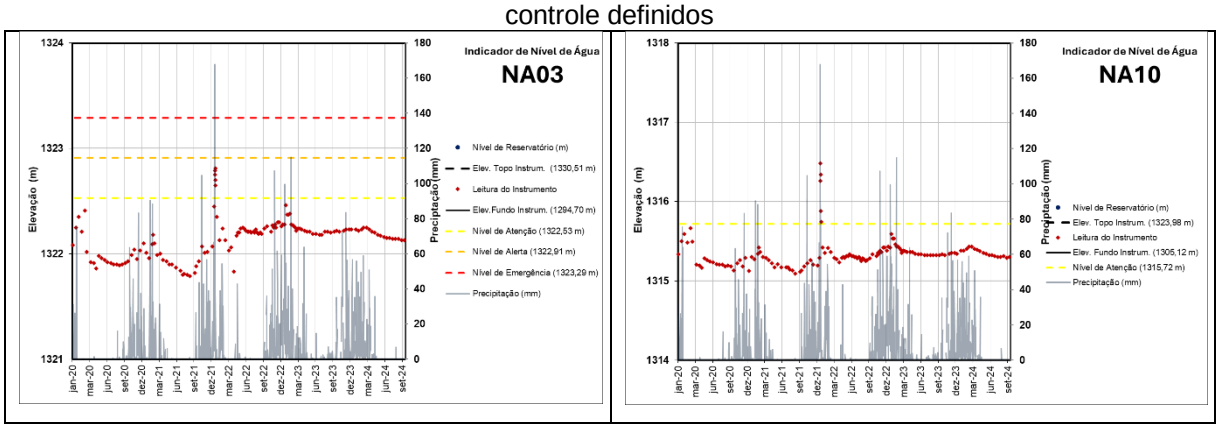
Essa metodologia resultou nos níveis de controle que são apresentados na Tabela 5.9. Observa-se que, no caso do medidor de vazão, o nível de controle estabelecido também comtempla o comportamento de diminuição de leitura, expresso pelo nível de atenção de 1,01 L/s abaixo da média de leitura, nesse caso foi adotado a média subtraído a duas vezes o desvio padrão.

Tabela 5.9 - Níveis de Controle estabelecidos com base em desvio padrão

Instrumento	Nível de Atenção (média + 2xdesvio padrão)	Nível de Alerta (média + 4xdesvio padrão)	Nível de Emergência (média + 6xdesvio padrão)
NA03	El 1322,53 m	El 1322,91 m	El 1323,29 m
NA10	El 1315,72 m	-	-
PZ11	El 1307,32 m	-	-
PZ12	El 1327,24 m	-	-
MV01	≥ 3,39 L/s / ≤ 1,07 L/s	4,55 L/s	5,71 L/s

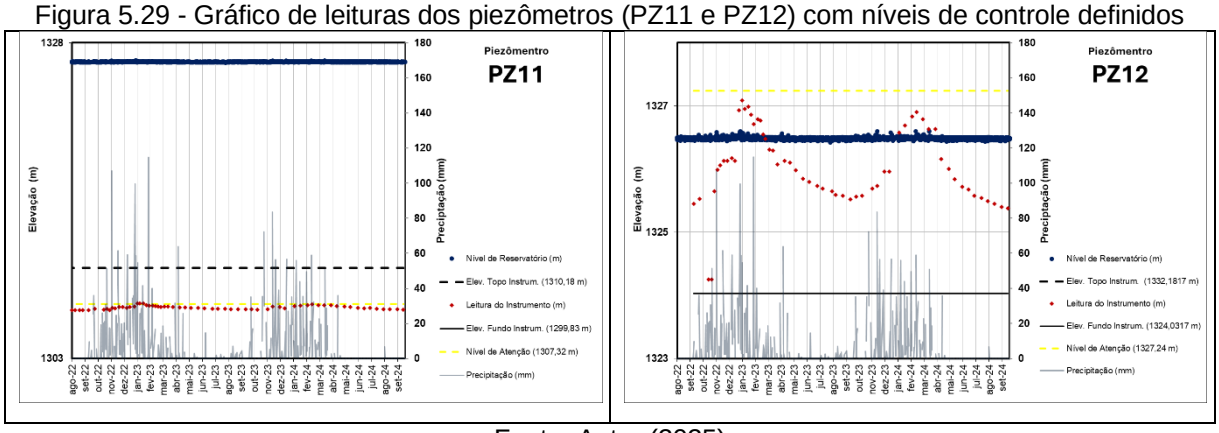
A Figura 5.28, Figura 5.29 e Figura 5.30, apresentam os gráficos dos indicadores de nível de água, piezômetros e medidor de vazão, apresentados na tabela anterior, juntamente com os níveis de controle definidos.

Figura 5.28 - Gráfico de leituras dos indicadores de nível de água (NA03 e NA10) com níveis de controle definidos



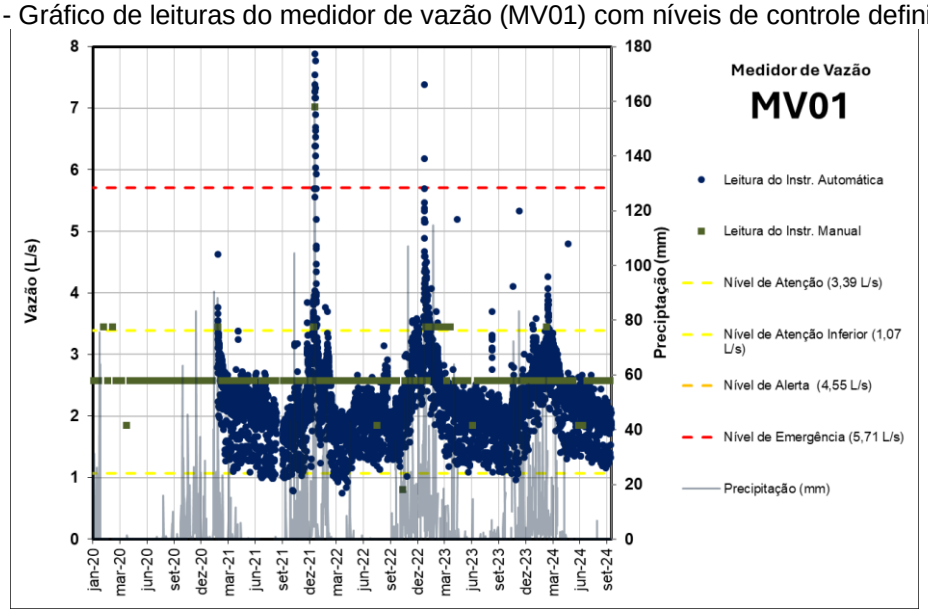
Fonte: Autor (2025)

Figura 5.29 - Gráfico de leituras dos piezômetros (PZ11 e PZ12) com níveis de controle definidos



Fonte: Autor (2025)

Figura 5.30 - Gráfico de leituras do medidor de vazão (MV01) com níveis de controle definidos



Fonte: Autor (2025)

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA E CONCLUSÃO

O estabelecimento de níveis de controle deve ser resultado de uma análise detalhada e específica da estrutura geotécnica. No contexto das barragens de mineração, é imprescindível considerar todos os modos de falha plausíveis, identificando, ainda, as limitações do monitoramento, caso existam. Fatores como características geológicas, processo construtivo, geometria de projeto e parâmetros geotécnicos conferem singularidade a cada barragem, tornando difícil a adoção de uma metodologia única; podendo ser, em alguns casos, desfavorável a segurança.

O presente estudo avaliou a definição de níveis de controle considerando não apenas a estabilidade estática, mas abrangendo todos os modos de falha monitoráveis com os instrumentos disponíveis. Diferenciando, portanto, de abordagens clássica em que se associa os fatores de segurança apenas ao fator de segurança de estabilidade estática.

Conclui-se que, mesmo em situações nas quais estruturas geotécnicas apresentam fatores de segurança elevados, o aumento do nível da superfície freática não garante a ausência de risco de ruptura. No caso específico da barragem em estudo, o modelo de percolação indicou a presença de zonas de surgência de água na superfície dos taludes, mesmo quando o fator de segurança superava 1,4. Uma vez que a surgência de água no talude jusante da barragem pode comprometer a sua segurança e favorecer o desenvolvimento de *piping*, é fundamental considerar esse potencial risco nas análises de segurança.

Além disso, diante das características e condições da Barragem Estudo, os níveis de controle de segurança estabelecidos para o seu sistema de monitoramento também foram baseados no desempenho da estrutura, especialmente o sistema de drenagem. Os modelos de estabilidade e percolação abrangeram a maior parte dos instrumentos, sendo para os instrumentos não contemplados no modelo foram aplicados níveis de controle estatísticos. Observa-se que devido às condições tridimensionais da estrutura, o modelo 2D adotado para o estabelecimento de níveis de controle apresenta limitações.

Os resultados dos níveis de controle obtidos mostraram-se consistentes com o sistema de monitoramento utilizado. Observou-se que, nos casos dos instrumentos PZ09 e PZ10, os níveis registrados aproximaram-se das leituras históricas, o que é coerente com o elevado grau de variação desses instrumentos e com a região de sensibilidade em que estão localizados, tanto para o modo de falha de estabilidade estática quanto para infiltração e erosão interna.

Ademais, os níveis de controle definidos não devem ser considerados estáticos no monitoramento geotécnico da barragem. Pelo contrário, é essencial que sejam revisados sempre que houver alterações nos instrumentos ou mudanças nas condições operacionais e características da estrutura.

Por fim, quanto ao acionamento dos níveis de controle, é importante destacar que estes funcionam como parâmetros de referência, devendo o desempenho estrutural e as condições de estabilidade serem analisados de forma integrada, e não com base em acionamentos isolados dos instrumentos.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na elaboração do presente trabalho surgiram alguns aspectos de interesse para uma abordagem mais detalhada, tanto em relação a Barragem Estudo como no avanço de metodologias para o estabelecimento de níveis de controle e monitoramento de barragens de mineração. A seguir, são apresentados os temas que poderão ser objeto de investigações futuras:

- Aplicar análise de fluxo e estabilidade 3D na Barragem Estudo comparativamente aos resultados obtidos em modelo 2D e aplicar a metodologia apresentada na dissertação;
- Análise de dados do sistema de monitoramento de deslocamentos e estudo de tensão-deformação com vista na aplicação de níveis de controle;
- Estudo estatístico e probabilístico dos parâmetros de permeabilidade por meio do software SLIDE2 com vista ao estabelecimento de porcentagens de colmatação para estabelecimento de níveis de controle;

- Estudo do gradiente hidráulico de saída com vista ao estabelecimento de níveis de controle em relação ao modo de falha de *piping* e erosão interna.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Resolução n° 95**, de 7 de fevereiro de 2022. Cria regras para o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8°, 9°, 10, 11 e 12 da Lei n° 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasil, 2022

ALVES, Felipe de Vasconcelos. **Estudo de sismicidade do Brasil para revisão da ABNT NBR 15421**. 2020. Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15421:2023 – Projeto de estruturas resistentes a sismos – Requisitos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023

ASSUMPÇÃO, Marcelo de Sousa et al. **Terremotos no Brasil: preparando-se para eventos raros**. Boletim SBGf, n. 96, p. 25-29, 2016. Disponível em: http://www.sbgf.org.br/home/images/Boletim_96-2016.pdf.

ÁVILA, J P; SAWAYA, M.; SAYÃO, A. S. F.; FERREIRA, L. A. (2021). **Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes.** Geotecnia 152, pp. 435-464.

ÁVILA, J. P. **Barragens de Rejeitos no Brasil**. 1.ed. ed. Rio de Janeiro: 2012, 2012.

BICALHO, Kátia Vanessa; MACHADO, Sandro Lemos; GERSCOVICH, Denise M. S. Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. In: *Solos não saturados no contexto geotécnico*. Rio de Janeiro: Editora XYZ, 2015. Cap. 13. p. 405. Disponível em: https://doi.org/10.4322/978-65-992098-3-3.cap13. Acesso em: 2 dez. 2024.

BITTAR, R.J. – **Acidentes e incidentes em barragens de rejeitos: como prevenir ou atenuá-los?** In: II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos – SGBR. Belo Horizonte, maio/2017.

BRADLOW, Daniel D.; PALMIERI, Alessandro; SALMAN, Salman MA. **Regulatory frameworks for dam safety: A comparative study**. World Bank Publications, 2002.

BRAY, Jonathan D.; MACEDO, Jorge. **Procedure for estimating shear-induced seismic slope displacement for shallow crustal earthquakes**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, v. 145, n. 12, p. 04019106, 2019.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the mocement of soil moisture**. Waxhington, USDA: soils Bulletin 38, 1907. 61p.

BUDHU, Muniram. **Soil mechanics and foundations**. John Wiley and Sons, 2010.

CACCIUTTOLO, Carlos et al. **Process water management and seepage control in tailings storage facilities: Engineered environmental solutions applied in Chile and Peru**. Water, v. 15, n. 1, p. 196, 2023.

CACCIUTTOLO, Carlos et al. **Sensor Technologies for Safety Monitoring in Mine Tailings Storage Facilities: Solutions in the Industry 4.0 Era.** Minerals, v. 14, n. 5, p. 446, 2024.

CACCIUTTOLO, Carlos; CANO, Deyvis. Spatial and Temporal Study of Supernatant Process Water Pond in Tailings Storage Facilities: Use of Remote Sensing Techniques for Preventing Mine Tailings Dam Failures. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 4984, 2023.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO A. N, RODRIGUES M. A. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 7°ed, 2019

CARDOZO, Fernando Alves Cantini. Comparação de métodos construtivos para barragens de rejeito: análise dos alteamentos à montante e à jusante. In: CARDOZO, Fernando Alves Cantini (org.). *Geotecnologias: análises, técnicas e aplicações em pesquisa - Volume 2*. São Paulo: Editora Científica Digital, 2024. Cap. 3, p. 44-59. DOI: 10.37885/240616856. Disponível em: https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/240616856.

CEDRO, Letícia Guimarães. **Análise do processo de adensamento aplicado ao fechamento de reservatório de rejeito de bauxita.** 2023. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023

Centro de Sismologia da USP. ***Boletim de Sismicidade***. Disponível em: https://moho.iag.usp.br/eq/bulletin. Acesso em: 18 nov. 2024.

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. **An overview of conventional tailings dam geotechnical failure mechanisms.** Mining, Metallurgy & Exploration, v. 38, n. 3, p. 1305-1328, 2021.

CLARKSON, Luke; WILLIAMS, David. Catalogue of example instrumentation and monitoring systems for tailings dams in Australia. **Mining Technology**, v. 130, n. 2, p. 119-129, 2021.

CLARKSON, Luke; WILLIAMS, David; SEPPÄLÄ, Jaakko. **Real-time monitoring of tailings dams**. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, v. 15, n. 2, p. 113-127, 2020.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, materiais de Construção, Projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2ºed, 2004.

DARCY, H. **Les fountainespubliques de la ville de dijon**. Paris: Dalmont, 1856.

DAS, Braja M. **Advanced soil mechanics**. CRC press, 2019.

DAS, Braja; M.; SOBHAN, **Khaled. Principles of geotechnical engineering**. 9. Ed. Boston: 20 Channel Center Street Ed 2018.

DUNCAN, J.M. and WRIGHT, S.G. ***Soil Strength and Slope Stability****.* John Wiley & Sons Inc. 2005.

DUNNICLIFF, John. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. John Wiley & Sons, 1993.

FELL, R., WHITT, G., MINER, A. FLENTJE, P. N. **Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning**. Australian Geomechanics Journal, 42 (1), 13-36. 2007.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. **Geotechnical engineering of dams**. 2. ed. The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2015.

FERNANDES, Rafaela Baldi et al. **Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

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**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de pósgraduação em Engenharia Civil. Ouro Preto, 2003.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. **Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. John Wiley & Sons. (2013).

FUSARO. T. C. **Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau**. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GARCIA, Flávia Ferreira et al. **Mine tailings dams' failures: Serious environmental impacts, remote solutions**. Environment, Development and Sustainability, p. 1-23, 2024.

Garner, S.J. e Fannin, R.J. 2010. **Understanding internal erosion: a decade of research following a sinkhole event.** The International J. on Hydropower & Dams 17: 93-98.

GEOSENSE. Catálogo de Produtos. Disponível em: https://www.geosense.com/products/water-level-meter/

GJERAPIC, G.; ZNIDARCIC, D. **Assessment of Liquefaction Triggering for Upstream Tailings Dams Using Limiting Equilibrium Methods**. In: Tailings and Mine Waste'20; Proceedings of the 24th international conference on tailings and mine waste, Virtual event, 15–18 November 2020. 2020.

GOMES, Érika; RODRIGUES, Sabrine; FANTE, Fernando; LOURES, Samuel. Gradientes hidráulicos associados a níveis de controle: estudo de caso de uma barragem para disposição de rejeitos. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Balneário Camboriú, SC. Balneário Camboriú: COBRAMSEG, 2024

GUILLEN, JORGE LUIS CARDENAS. **Estudo de Modelos Constitutivos para Previsão da Liquefação em Solos sob Carregamento Monotônico**. 2004.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) **Desenvolvendo um Manual de Operação, Manutenção e Monitoramento para Instalações de Gestão de Rejeitos e Água;** Instituto Brasileiro de Mineração e a Mining Association of Canada (MAC), v. 2.1. - Brasília, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Guia de boas práticas de gestão de barragens e estruturas de disposição de rejeitos. Brasília: IBRAM, 2019. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2019/09/arte_gestao_barragem_ibram_web.pdf.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. p. 10. Brasília. 2012.

International Commission on Large Dams - ICOLD. 2001. **Tailings dams: risk of dangerous occurrences**: lessons learnt from practical experiences. United Nations Publications

JEFFERIES, M., BEEN, K. (2016) – **Soil liquefaction - A Critical State Approach** 2ª Edição. Boca Raton, FL.

Kealy, C.D. and Busch, R.A. (1971) **Determining Seepage Characteristics of Mill-Tailings Dams by the Finite Element Method**, U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 7477

LEDESMA, Osvaldo; SFRISO, Alejo; MANZANAL, **Diego. Procedure for assessing the liquefaction vulnerability of tailings dams**. Computers and Geotechnics, v. 144, p. 104632, 2022.

LYU, Zongjie et al. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history. Advances in Civil Engineering, v. 2019, n. 1, p. 4159306, 2019.

MARINARO, Rodrigo de Aguiar. **Proposta de metodologia para definição dos níveis de controle da instrumentação associados aos modos de falha: estudo de caso em uma barragem para disposição de rejeito de mineração**. 2022.159 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

MARINARO, Rodrigo de Aguiar. **Proposta de metodologia para definição dos níveis de controle da instrumentação associados aos modos de falha: estudo de caso em uma barragem para disposição de rejeito de mineração**. Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2022.

Martin, T.E. and Davies, M.P. 2000. Development and review of surveillance programs for tailings dams. Association of State Dam Safety Officials. Las Vegas, Nevada

MELLO F M, SANDRONI S. S., GUIDICIN G. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil** Rio de Janeiro. Comitê Brasileiro de Barragens, 2021.

MITCHELL, James Kenneth et al. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley & Sons, 2005.

MORGENSTERN, N. R. et al. **Fundão tailings dam review panel report on the immediate causes of the failure of the Fundão dam**. Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP, New York, 2016.

Muskat, M., **The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media**. McGraw-Hill, New York. 1946.

NUNES, Alfredo João Carvalho et al. Deterministic and Statistical Analysis in the Definition of Triggered Action Response Plans in Tailings Dams. 2023.

OKEKE, Austin Chukwueloka-Udechukwu; WANG, Fawu. Hydromechanical constraints on piping failure of landslide dams: an experimental investigation. **Geoenvironmental Disasters**, v. 3, p. 1-17, 2016.

PAPADIMITRIOU et al, 2014. ***Methodology for Estimating Seismic Coefficients for Performance Based Design of Earth dams and Tall Embankments*****, Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v.56, p. 57–73, 2014

PEREIRA, Eduardo Marques Vieira. **Estudo da fragilidade sísmica de pórticos de concreto armado com irregularidades estruturais**. 2021. 1 recurso online (139 p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12733/1640954. Acesso em: 3 dez. 2024.

PICIULLO, Luca et al. A new look at the statistics of tailings dam failures. **Engineering Geology**, v. 303, p. 106657, 2022.

RANA, S., & MISHRA, V. N. (2023). **Dam Health Check and Monitoring Using Advanced Tools of Geophysics.** In Proceedings of the 2nd International Conference on Dam Safety Management and Engineering. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-99-3708-0_22.

RICHARDS LA. **Capillary conduction of liquids through porous mediums.** Physics Rev. v.54, n 6, p. 318-333, 1931. https://doi.org/10.1063/1.1745010

Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A.R., Diaz-Herrero, A., e Pereira, H.G. **Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context**. Journal of hazardous materials, 2007

ROBERTSON, P. K. et al. Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I. Commissioned by Vale, 2019.

Sabadini, M. F. et al. **Níveis de controle para avaliação da segurança de barragens – estudo de caso – barragem principal**. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG. 2018

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. Oficina de textos, 2006.

SISGEO. Catálogo de Produtos. Disponível em: https://sisgeo.com/products/piezometers/casagrande-and-standpipe-piezometers/

SISSON, R; ZYL, V D. **Risk-Based Planning of Monitoring Programs for TARPs**. In: Tailings and Mine Waste'24; Proceedings of Tailings and Mine Waste 2024, Colorado, USA, 10–13 November 2024. 2024.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos**. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

Sun, S. Y. et al **Holden Mine Post Closure Monitoring – a Statistical Method for Developing Trigger Action Levels**. In: Tailings and Mine Waste'24; Proceedings of Tailings and Mine Waste 2024, Colorado, USA, 10–13 November 2024. 2024.

Taguchi, G. 2014. **Fault Tree Analysis of Slurry and Dewatered Tailings Management: A Framework**, Dissertação de Mestrado em Ciências Aplicadas, University of British Columbia, Vancouver.

TEIXEIRA, Thiago Azevedo. **Avaliação da suscetibilidade à liquefação com base em ensaios CPTu, com aplicação à Barragem de Fundão, Mariana (MG)**. 2023. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

U.S. Department of Interior. Bureau Of Reclamation. 2014. **Embankment Dams - Design Standards nº13**, Capítulo 9 "Instrumentation and Monitoring".

U.S. Department of the Interior (2013) **Best Practices and Risk Methodolo**

VASCONCELLOS, Túlio Marcos de et al. Discussão sobre valores de controle para a instrumentação de barragens. XXXIV Seminário Nacional De Grandes Barragens, Foz Do Iguaçu, PR, 20p, 2023.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VELTEN, R. Z. et al. **Proposição de Metodologia para a Elaboração de Carta de Risco.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, 2016.

VICK, S. G., **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. BiTech Publishers, Vancouver. 1990.

Zhang, L. M., Xu, Y., e Jia, J. S. **Analysis of earth dam failures: A database approach**. Georisk, 2009

ZNIDARCIC, D; GJERAPIC, G; GILLETTE, D R. **Critical Seepage Analyses for Stability of Tailings Dams**. In: Tailings and Mine Waste'24; Proceedings of Tailings and Mine Waste 2024, Colorado, USA, 10–13 November 2024. 2024.