



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



ISADORA MARIA CARNEIRO FAGUNDES

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PIEZOMÉTRICO E DEFINIÇÃO DE NÍVEIS
DE CONTROLE EM BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS**

OURO PRETO

2026

Isadora Maria Carneiro Fagundes

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PIEZOMÉTRICO E DEFINIÇÃO DE NÍVEIS
DE CONTROLE EM BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Ouro Preto como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Dr. Felipe de Campos Loch

OURO PRETO

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F156a Fagundes, Isadora Maria Carneiro.
Análise do comportamento piezométrico e definição de níveis de controle em barragem de contenção de rejeitos. [manuscrito] / Isadora Maria Carneiro Fagundes. - 2026.
52 f.

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

1. Geotecnia. 2. Barragem de rejeitos. 3. Análise estrutural (Engenharia) - Estabilidade. I. Loch, Felipe de Campos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Isadora Maria Carneiro Fagundes

Análise do comportamento piezométrico e definição de níveis de controle em barragem de contenção de rejeitos

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

Aprovada em 02 de março de 2026

Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Enga. Ariane Braga Fachinetti Lopes - (Pimenta D'Ávila Consultoria)
Ma. Juliana Braguim Neves - (Pimenta D'Ávila Consultoria)

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch**, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 04/03/2026, às 17:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1069496** e o código CRC **D6309178**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e persistência ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais, Robson e Goreth, por todo o amor e apoio constante. Obrigada por sempre acreditarem em mim, por todos os esforços realizados para que eu pudesse estudar e por serem meu maior exemplo de dedicação e caráter.

Ao meu irmão, Felipe, pelo companheirismo, apoio e por estar presente ao longo dessa caminhada. Sua torcida e incentivo foram muito importantes para que eu seguisse firme até aqui.

Ao meu noivo, Bruno, pelo amor, paciência e apoio constante em todos os momentos. Obrigada por compreender minhas ausências e me dar forças nos momentos mais desafiadores. Ter você ao meu lado tornou essa jornada mais leve e especial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Loch pelo comprometimento, disponibilidade e por todo o conhecimento compartilhado. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Civil, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da graduação, fundamentais para minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas e amigos, pelo companheirismo ao longo de toda a graduação.

Por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“É justo que muito custe o que muito vale.”

-Santa Teresa d'Ávila

RESUMO

O avanço das técnicas de lavra e beneficiamento tem permitido a exploração de jazidas com teores cada vez mais baixos, resultando no aumento da geração de rejeitos e das estruturas utilizadas para sua contenção. As barragens de rejeitos são estruturas geotécnicas de grande porte cujo comportamento está fortemente associado às condições de fluxo e às pressões de água no interior do maciço e na fundação. A distribuição das pressões neutras e a variação da carga piezométrica influenciam diretamente o estado de tensões efetivas do material, podendo impactar a estabilidade da estrutura e, conseqüentemente, o fator de segurança calculado. Embora o histórico de segurança de barragens exista há décadas, observa-se recentemente maior preocupação com o tema e com a atuação do Estado brasileiro. Nesse contexto, o controle e o monitoramento piezométrico tornam-se aspectos fundamentais para a avaliação do desempenho e da segurança dessas estruturas durante a sua operação, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento dessas estruturas. O estabelecimento dos níveis de controle da instrumentação auxilia na avaliação da segurança da estrutura, permitindo identificar variações dos fatores de segurança relacionadas às condições de fluxo e poropressões que possam comprometer sua estabilidade, além de delimitar os limites esperados para cada instrumento. Assim, o presente trabalho teve como objetivo definir os níveis de controle para uma barragem de rejeitos, avaliando a importância da instrumentação geotécnica para a verificação da segurança e da eficiência do sistema de monitoramento. A metodologia baseou-se na análise de dados reais de instrumentação, através das leituras de piezômetros e registros pluviométricos, com avaliação da interferência da pluviometria nos níveis piezométricos. A definição dos níveis de controle foi realizada a partir de parâmetros hidráulicos obtidos por retroanálises de fluxo e de análises de estabilidade pelo método do equilíbrio limite, considerando condições normal e críticas de operação. Os resultados permitiram avaliar a contribuição dos níveis de controle para a verificação da segurança da estrutura como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Ressalta-se que os níveis de controle não devem ser utilizados de forma isolada, mas integrados a análises técnicas contínuas e à avaliação global da estabilidade da barragem. Cabe destacar que a metodologia aplicada apresenta certas limitações, associando-se apenas ao modo de falha de instabilização, não se enquadrando a outros modos de falha, como erosão interna, por exemplo.

Palavras-chaves: Barragem de rejeitos, Monitoramento geotécnico, Níveis de controle.

ABSTRACT

The advancement of mining and processing techniques has enabled the exploitation of ore deposits with increasingly lower grades, resulting in a greater generation of tailings and an expansion in the number and size of structures used for their containment. Tailings dams are large geotechnical structures whose behavior is strongly associated with flow conditions and water pressures within the dam body and its foundation. The distribution of pore pressures and the variation of piezometric head directly influence the effective stress state of the material, which may impact the stability of the structure and, consequently, the calculated factor of safety. Although the safety of dams has been studied for decades, there has recently been a growing concern regarding the subject and the role of the Brazilian State in its regulation and oversight. In this context, piezometric control and monitoring become fundamental aspects for evaluating the performance and safety of these structures during their operation, enabling continuous monitoring of their behavior. The establishment of instrumentation control levels assists in assessing structural safety by allowing the identification of variations in safety factors related to flow conditions and pore pressures that may compromise stability, in addition to defining the expected limits for each instrument. Thus, the objective of this study was to define control levels for a tailings dam, evaluating the importance of geotechnical instrumentation for verifying structural safety and the efficiency of the monitoring system. The methodology was based on the analysis of real instrumentation data, including piezometer readings and rainfall records, with an evaluation of the influence of rainfall on piezometric levels. The definition of control levels was carried out based on hydraulic parameters obtained through flow back-analyses and stability analyses using the limit equilibrium method, considering normal and critical operating conditions. The results made it possible to evaluate the contribution of control levels to the verification of structural safety as a decision-support tool. It is important to highlight that control levels should not be used in isolation, but rather integrated with continuous technical analyses and the overall assessment of dam stability. It should also be noted that the applied methodology has certain limitations, as it is associated only with the instability failure mode and does not encompass other failure modes, such as internal erosion, for example.

Keywords: Tailings dam, Geotechnical monitoring, Control levels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de seção típica de uma barragem alteada a montante.....	19
Figura 2 – Exemplo de seção típica de uma barragem alteada a jusante	19
Figura 3 – Exemplo de seção típica de uma barragem alteada pela linha de centro	20
Figura 4 - Esquema do piezômetro de tubo aberto.....	23
Figura 5 - Esquema do piezômetro elétrico de corda vibrante	24
Figura 6 - Esquema do medidor de nível de água	24
Figura 7 - Força resultante da interação entre as fatias - Método de Spencer (1967)	26
Figura 8 - Etapas do trabalho	28
Figura 9 - Seção A instrumentada	29
Figura 10 - Seção B instrumentada	29
Figura 11 - Seção A – Condição normal operacional	36
Figura 12 - Seção A – Condição crítica: nível de atenção	37
Figura 13 - Seção A – Condição crítica: nível de alerta.....	38
Figura 14 - Seção A – Condição crítica: nível de emergência	39
Figura 15 - Seção B – Condição normal operacional.....	40
Figura 16 - Seção B – Condição crítica: nível de atenção.....	41
Figura 17 - Seção B – Condição crítica: nível de alerta.....	42
Figura 18 - Seção B – Condição crítica: nível de emergência	43
Figura 19 - Pluviometria diária e cotas piezométricas dos instrumentos – Seção A.....	44
Figura 20 - Pluviometria diária e cotas piezométricas dos instrumentos – Seção B.....	45

Figura 21 - Níveis de controle e máximas históricas – Seção A.....	45
Figura 22 - Níveis de controle e máximas históricas - Seção B.....	46
Figura 23 - Histórico das leituras piezométricas do piezômetro PZ-A-5 com indicação dos níveis de controle – Seção A	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados cadastrais da instrumentação nas seções analisadas.....	30
Tabela 2 - Parâmetros geotécnico e hidráulicos utilizados nas análises de estabilidade ..	31
Tabela 3 - Faixa de variação do fator de segurança adotado.....	33
Tabela 4 - Níveis de controle obtidos para as seções A e B.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

FS – Fator de Segurança

F_f – Equilíbrio de forças

F_m – Equilíbrio de momentos

MEL – Método de Equilíbrio Limite

MNA – Medidor de Nível d'Água

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PZ – Piezômetro de Tubo Aberto

PZE – Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante

SUMÁRIO

1.	Introdução	15
1.1.	Objetivo	16
1.1.1.	Objetivos específicos	16
2.	Revisão da literatura	17
2.1.	Mineração e disposição de rejeitos	17
2.2.	Barragens de mineração.....	17
2.2.1.	Métodos construtivos de alteamento	18
2.3.	Segurança de barragens	20
2.3.1.	Legislação e normas brasileiras	21
2.4.	Monitoramento e instrumentação geotécnica em barragens.....	22
2.4.1.	Piezômetros (PZ)	22
2.4.2.	Medidores de nível de água (MNAs)	24
2.5.	Níveis de controle	25
2.6.	Análise de estabilidade	25
2.6.1.	Método de Spencer (1967)	26
3.	Metodologia.....	28
3.1.	Descrição geral da estrutura	28
3.2.	Seções analisadas.....	28
3.3.	Dados cadastrais da instrumentação	29
3.4.	Estabelecimento dos níveis de controle.....	30
3.4.1.	Condições de contorno	31
3.4.2.	Análise de estabilidade	32
4.	Resultados e Discussões	34
4.1.	Níveis de controle	34
4.2.	Análise de dados	44

4.2.1.	Pluviometria e cotas piezométricas	46
5.	Conclusão	48

1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas de engenharia que acompanharam o desenvolvimento do homem desde a antiguidade, pois permitiram sua fixação à terra através do fornecimento de água para consumo humano e animal, desenvolvimento da agricultura através da irrigação e o avanço da indústria por meio da geração de energia elétrica. Essas obras foram empregadas como impulsionadoras do crescimento, sendo diretamente ligadas ao desenvolvimento (FUSARO, 2007).

Devido a expansão das atividades do setor minerário, surgiram as barragens de rejeito, definidas pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2022) como reservatório destinado a reter resíduos sólidos e água resultantes de processos de beneficiamento mineral. Segundo Duarte (2008), as principais diferenças entre a gestão de barragens convencionais e de barragens de contenção de rejeitos são principalmente no método construtivo. As barragens convencionais são construídas em etapa única, enquanto as barragens de contenção de rejeitos são construídas em diversos estágios, sempre mudando com o aumento progressivo da carga dos rejeitos na fundação do reservatório.

No Brasil, graves problemas com o rompimento de barragens demonstram a importância de manter estruturas desse porte seguras (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2019). Nesse sentido, a legislação tem se tornado mais rigorosa. Recentemente, a lei de segurança de barragens, nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 foi alterada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, com mudanças que deverão ser incorporadas e implementadas pelos empreendedores e órgãos fiscalizadores (BRASIL, 2020). Essa evolução na legislação demonstra uma atenção cada vez maior à segurança das barragens, sendo o monitoramento uma etapa indispensável na prevenção de falhas desse tipo de estrutura.

Com objetivo de mitigar os riscos associados a esse tipo de estrutura, justifica-se o crescente aprimoramento legislativo. No entanto, apenas o atendimento às exigências legais não garante a segurança da estrutura, sendo indispensável o acompanhamento contínuo de seu comportamento ao longo da vida útil. Nesse contexto, o monitoramento geotécnico desempenha papel fundamental para identificar possíveis anomalias, pois, quando baseado em dados confiáveis, auxilia na identificação precoce de possíveis acidentes. Diante desse contexto,

destaca-se a importância da análise dos dados de instrumentação geotécnica como ferramenta para a avaliação do comportamento de uma barragem.

Uma ferramenta utilizada para auxiliar na análise e tomada de decisões é o nível de controle. O estabelecimento dos níveis de controle da instrumentação auxilia na avaliação da segurança da estrutura, além de delimitar os limites esperados para cada instrumento. De acordo com a Resolução ANM N° 95 de 07 de fevereiro de 2022, alterada pelas resoluções ANM n° 130/2023 e n° 175/2024, esses níveis devem ser definidos individualmente para cada estrutura, a partir de avaliações de segurança.

Neste trabalho, é apresentado um estudo de caso de uma barragem de rejeitos, no qual foram analisados dados de instrumentação geotécnica com foco na avaliação do comportamento piezométrico e na determinação e aplicação de níveis de controle associados à análise de estabilidade.

1.1. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é definir os níveis de controle para a instrumentação de uma barragem de rejeitos, avaliando sua contribuição para determinar a segurança da barragem e a eficiência no monitoramento.

1.1.1. Objetivos específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Definir os níveis de controle para a instrumentação de uma barragem de rejeitos;
- Aplicar os níveis de controle em um estudo de caso, com objetivo de analisar sua importância na determinação da segurança de uma barragem de rejeitos;
- Comparar as leituras obtidas durante o monitoramento com os níveis de controle determinados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. MINERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

O avanço das técnicas de lavra e beneficiamento, somado pela busca por redução dos custos de produção, tem permitido a exploração de jazidas com teores cada vez mais baixos. O resultado desse avanço é um aumento significativo na geração de rejeitos e, consequentemente, na quantidade e no tamanho das estruturas utilizadas para sua contenção (OLIVEIRA, 2014).

Ainda segundo Oliveira (2014), a crescente necessidade de reaproveitamento da água proveniente do beneficiamento, associada à maior preocupação com questões ambientais, resultou no desenvolvimento dos sistemas de disposição de rejeitos. Diante desse contexto, observou-se um aumento significativo na adoção do confinamento de rejeitos através de diques e barragens de terra no processo do beneficiamento mineral.

2.2. BARRAGENS DE MINERAÇÃO

Segundo a NBR 13.028 (ABNT, 2017), barragem é definida como uma estrutura que forma uma parede para conter rejeitos, sedimentos e/ou para formação do reservatório de água. Essas estruturas podem ser construídas com solo, enrocamento ou com o próprio rejeito. As barragens de terra são construções de longa data. Um dos registros mais antigos é de uma barragem de 12 m de altura, localizada no Egito, há aproximadamente 6800 anos. Estas eram “homogêneas” e o material transportado manualmente e compactado por pisoteamento por animais ou homens. (MASSAD, 2003).

O uso de enrocamento iniciou-se, provavelmente, na Califórnia na década de 1850, devido à falta de material terroso. A compactação mecânica só foi introduzida de meados do século XIX para o século XX, portanto, muito antes da Mecânica dos Solos se estabelecer em bases científicas. No Brasil, as primeiras barragens de terra foram construídas no Nordeste, no início do século XX, como uma tentativa de combate à seca. Porém, somente em 1947 é que se inaugurou o uso da moderna técnica de projeto e construção de barragens de terra no país (MASSAD, 2003).

2.2.1. Métodos construtivos de alteamento

No passado, a escolha do método ou local para a disposição de rejeitos era um processo relativamente simples, baseado, em grande parte, na comparação de estimativas de custo entre as alternativas disponíveis, sendo geralmente escolhida a estimativa de menor custo. Entretanto, com o passar do tempo, outras questões passaram a ser mais aplicadas, em especial as considerações ambientais, que passaram a assumir importância igual ou até superior aos aspectos econômicos no planejamento da disposição de rejeitos (VICK, 1983).

Diante desse contexto, a seleção de um método ou local para a disposição de rejeitos passou a exigir uma análise mais cuidadosa das alternativas disponíveis. Tanto os aspectos econômicos quanto os ambientais precisam ser considerados e comparados no processo de decisão. Além disso, o processo de seleção passou a ser mais visível tanto para os órgãos reguladores quanto para o público, sendo exigida a responsabilização e a justificativa das decisões relacionadas à disposição de rejeitos (VICK, 1983). Nesse cenário, a definição do método construtivo de alteamento representa uma etapa fundamental do planejamento de barragens de rejeitos, sendo apresentados a seguir os principais métodos construtivos de alteamento.

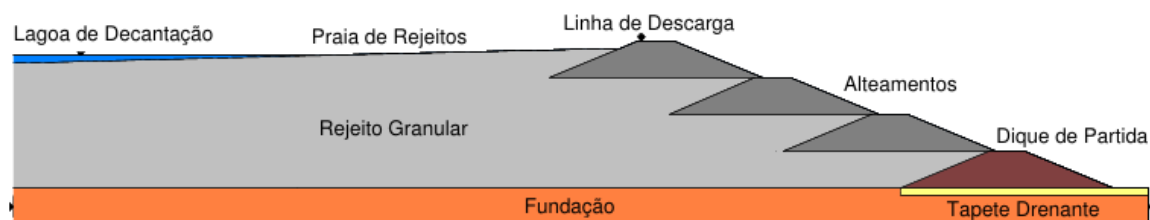
2.2.1.1. Alteamento a montante

De acordo com a Resolução ANM nº 175, de 1º de agosto de 2024, nesse método, os diques de contenção são alteados à montante, e estes alteamentos se apoiam majoritariamente sobre o próprio rejeito ou sedimento de mineração previamente lançado e depositado. A estrutura do barramento é iniciada a partir de um dique de partida, geralmente constituído de material argiloso ou enrocamento compactado. Após a conclusão dessa estrutura inicial, o próprio rejeito passa a ser lançado à montante ao longo da crista, constituindo a fundação e a base para execução dos alteamentos subsequentes. Essa fundação deve apresentar resistência a deslizamentos e uma capacidade de suporte adequada para evitar possíveis recalques excessivos (MACHADO, 2007).

Ainda segundo Machado (2007), considerando as variações nas características do rejeito ao longo dos diferentes alteamentos, os riscos de ruptura hidráulica associados a esse tipo de barragem são elevados. Após as rupturas das barragens de Fundão (2015) e Córrego do Feijão (2019), a Agência Nacional de Mineração publicou a Resolução ANM nº 4, de 15 de fevereiro de 2019. Dentre as principais determinações da normativa, destaca-se a proibição da utilização

do método de alteamento a montante em todo o território nacional, em razão dos riscos associados à estabilidade desse tipo de estrutura.

Figura 1 – Exemplo de seção típica de uma barragem alteada a montante



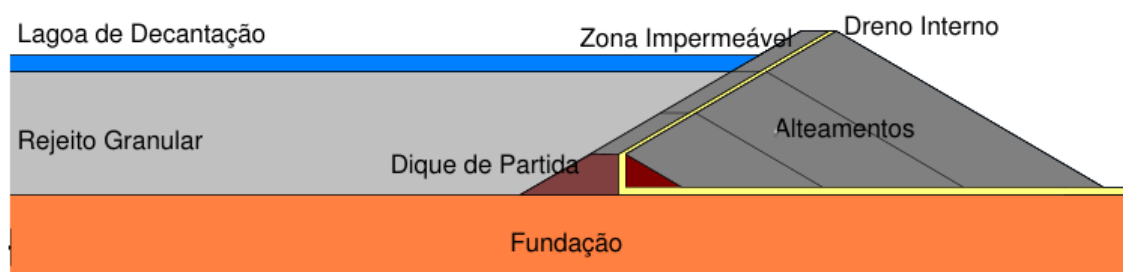
Fonte: (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

2.2.1.2. Alteamento a jusante

Esse método trata-se de uma solução clássica para barragens de rejeitos, principalmente pela facilidade de execução, uma vez que toda a obra é executada por jusante, sem a necessidade de aterros dentro do reservatório (OLIVEIRA, 2014). Segundo a Resolução ANM nº 175, de 1º de agosto de 2024, esse método consiste no alteamento para jusante a partir do dique inicial, onde os maciços de alteamento são construídos com material de empréstimo ou com o próprio rejeito.

As vantagens do método são o controle do lançamento do rejeito e da compactação. Destaca-se que o método é o mais seguro, devido ao maior rigor construtivo, diminuindo a possibilidade de ruptura por liquefação. Por outro lado, essa solução requer maior investimento financeiro quando comparado ao método de montante, devido à necessidade de maiores volumes de material (MACHADO, 2007).

Figura 2 – Exemplo de seção típica de uma barragem alteada a jusante



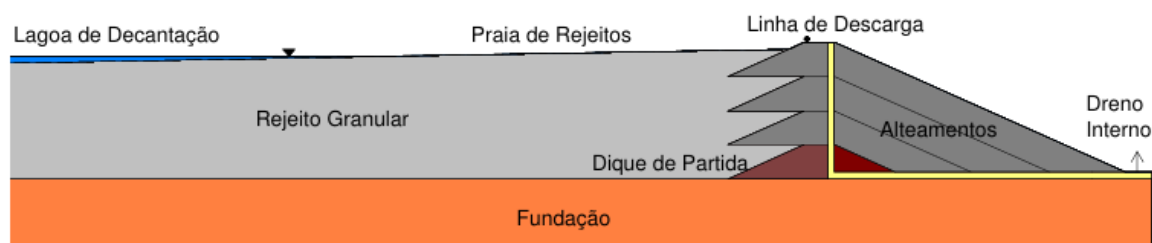
Fonte: (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

2.2.1.3. Alteamento por linha de centro

Esse método mostra-se vantajoso quando há insuficiência de materiais terrosos ou quando as propriedades de engenharia são inadequadas. Essa solução exige menor volume de material, resultando em menor custo de investimento quando comparado ao método de jusante (OLIVEIRA, 2014).

Ainda segundo Oliveira (2014), o alteamento por linha de centro implica na construção de parte da barragem apoiada sobre o rejeito, o que exige que os alteamentos sejam realizados com pequenas alturas, em geral não superiores a 3m.

Figura 3 – Exemplo de seção típica de uma barragem alteada pela linha de centro



Fonte: (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

2.3. SEGURANÇA DE BARRAGENS

As barragens de rejeitos são estruturas geotécnicas de grande porte cujo comportamento está fortemente associado às condições de fluxo e às pressões de água no interior do maciço e na fundação. A distribuição das pressões neutras e a variação da carga piezométrica influenciam diretamente o estado de tensões efetivas do material, podendo impactar a estabilidade da estrutura e, conseqüentemente, o fator de segurança calculado. A segurança deve ser o principal objetivo no projeto, na construção e na operação dessas estruturas, uma vez que a ruptura de uma barragem pode acarretar graves conseqüências em termos de impactos socioeconômicos e ambientais (FUSARO, 2007).

O histórico de Segurança de Barragens no mundo existe há várias décadas, contudo, observou-se nas últimas décadas uma crescente preocupação a respeito do tema segurança de barragens e a necessidade de uma maior atuação do Estado brasileiro. As barragens são estruturas importantes para o desenvolvimento da sociedade, porém, também podem aumentar a exposição da população a riscos considerados significativos. Acidentes com barragens geralmente causam impactos sociais e econômicos, além de possíveis perdas de vidas humanas,

motivo pelo qual a regulamentação deste tema se tornou necessária e indiscutível. (NEVES, 2018).

2.3.1. Legislação e normas brasileiras

No Brasil, segundo Lopes (2024), a segurança de barragens é regulamentada por várias leis e normas que ditam orientações para sua operação, manutenção e descomissionamento, a fim de garantir proteção à vida, do meio ambiente e do patrimônio. Esse conjunto de leis e normas serve para garantir um bom funcionamento da estrutura, além de assegurar a construção e operação de forma segura. Ainda, estabelecem obrigatoriedade de monitoramento contínuo, com relatórios periódicos e inspeções, além de planos de emergência para a mitigação dos impactos de possíveis falhas.

O monitoramento geotécnico representa uma etapa fundamental na prevenção de acidentes nos empreendimentos de barragens. O acompanhamento contínuo do comportamento dessas estruturas vem sendo intensificado, especialmente após registro de falhas passadas nessas estruturas. Abaixo, são citadas algumas das leis federais, normas técnicas e resoluções da Agência Nacional de Mineração (ANM) relacionadas à segurança de barragem de mineração:

- Lei nº 12.334/2010: Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água, rejeitos e resíduos industriais e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.
- Lei nº 14.066/2020: Altera a Lei nº 12.334/2010, com o objetivo de tornar mais rigorosa a Política Nacional de Segurança de Barragens, reforçando a fiscalização e as penalidades em casos de negligência.
- Norma ABNT NBR 13028:2025: Especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto destinados à disposição de rejeitos de mineração, com objetivo de atender às condições de segurança, operacionalidade e à minimização de impactos ambientais.
- Resolução ANM nº 95/2022: Estabelece exigências relacionadas à segurança de barragens de mineração, definindo critérios, procedimentos e responsabilidades para a gestão da segurança dessas estruturas.
- Resolução ANM nº 175/2024: Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

2.4. MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM BARRAGENS

Segundo Fonseca (2003), instrumentação é o processo de aquisição, registro e processamento sistemático dos dados obtidos a partir dos instrumentos geralmente instalados no aterro ou nas fundações da barragem.

Segundo Dunnicliff (1988), a instrumentação geotécnica não se resume apenas na seleção de um instrumento, mas envolve a integração entre a capacidade do instrumento de medida e a capacidade de interpretação e análise dos profissionais responsáveis. Dessa forma, os instrumentos podem ser classificados em duas categorias, de acordo com sua finalidade:

- a) Instrumentos usados para determinar as propriedades de solos e rochas in situ: objetivos de definir parâmetros geotécnicos como resistência, compressibilidade e permeabilidade, sendo usados normalmente durante a fase de projeto das obras (tais como piezocone, palheta e pressiómetro).
- b) Instrumentos usados para monitorar o comportamento da obra durante construção/operação: podem envolver medidas de pressão da água subterrânea, tensão total, deformação e/ou carregamento aplicado (tais como piezômetros, medidores de nível de água e inclinômetros).

Considerando os objetivos do presente trabalho, será considerada apenas a segunda finalidade definida por Dunnicliff (1988).

2.4.1. Piezômetros (PZ)

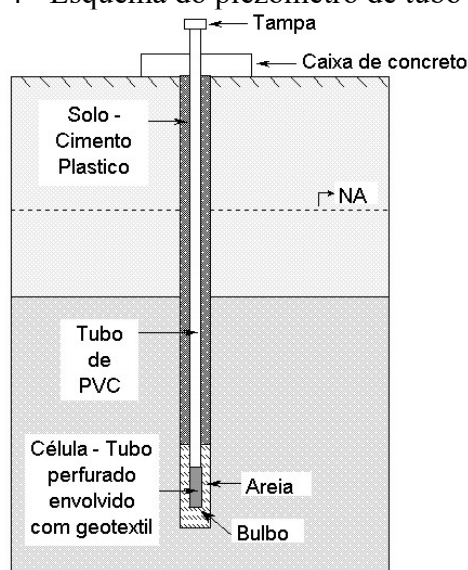
Piezômetros são dispositivos utilizados para medir a pressão da água no interior da barragem. A medição pode ser realizada pela altura até a qual uma coluna de água se eleva contra a gravidade ou por meio de sensores que medem diretamente a pressão da água em um ponto específico (ANA, 2022).

Segundo Machado (2007), esse tipo de instrumento não deve ser instalado em locais onde o maciço rochoso seja pouco fraturado, ou onde o ensaio da perda d'água sob pressão, no furo, indique não haver perda d'água. Pode ser instalado em profundidades diferentes a jusante da barragem. Atualmente, existem diversos tipos de piezômetros, cada um com uma característica específica, e a escolha varia de acordo com fatores como a sensibilidade, necessidade de leituras automatizadas, custo, entre outros.

2.4.1.1. Piezômetro de tubo aberto ou de Casagrande

O piezômetro de tubo aberto, também conhecido como piezômetro de Casagrande, é um modelo amplamente utilizado no monitoramento de barragens. Segundo Machado (2007), o procedimento de leitura do nível de água é realizado por meio de um cabo elétrico com dois condutores, graduado de metro em metro, com um sensor em sua extremidade. Quando o sensor atinge o nível de água no interior do tubo, o circuito é fechado, indicando o contato com a lâmina d'água. A cota piezométrica resultante é obtida pela diferença entre a cota de boca e a leitura do comprimento do cabo.

Figura 4 - Esquema do piezômetro de tubo aberto



Fonte: (FONSECA, 2003)

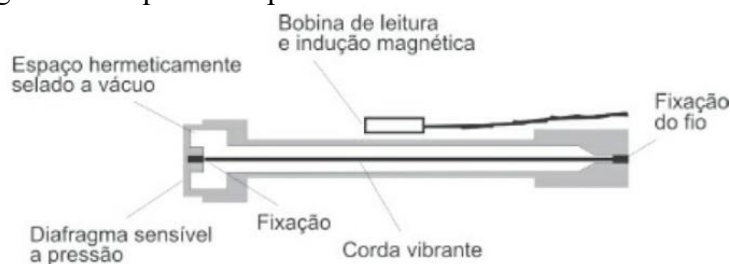
Dentre as vantagens desse tipo de instrumento, destacam-se a simplicidade, confiabilidade e custos reduzidos. Os piezômetros de tubo aberto são amplamente utilizados em programas de auscultação de barragens de terra e enrocamento, sendo instalados convencionalmente nas fundações, ombreiras e em zonas específicas no próprio maciço da barragem (OLIVEIRA, 2014).

2.4.1.2. Piezômetro elétrico de corda vibrante

É um instrumento amplamente utilizado para a medição de poropressões e subpressões. Diferentemente dos piezômetros de tubo aberto, o piezômetro de corda vibrante fornece leituras indiretas de nível d'água, obtidas a partir da medição da pressão exercida pela água no sensor instalado no interior do maciço. Além disso, destaca-se por ser considerado um instrumento de

fácil instalação e leitura, resposta rápida e possibilidade de automação das leituras (MACHADO, 2007).

Figura 5 - Esquema do piezômetro elétrico de corda vibrante



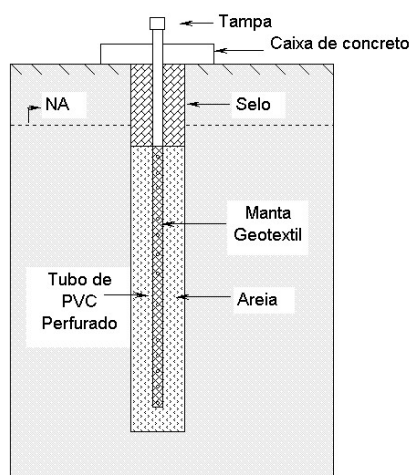
Fonte: (SILVEIRA, 2006)

2.4.2. Medidores de nível de água (MNAs)

O instrumento é de simples construção e operação e tem como principal objetivo a determinação da posição da linha freática dentro da estrutura. A instalação desse instrumento necessita, basicamente, a execução de um furo de sondagem ou de um poço, no qual o instrumento é posicionado de modo a permitir a medição do nível d'água no interior do maciço (MACHADO, 2007).

O medidor de nível d'água consiste em um tubo, geralmente em PVC, com perfurações em sua ponta, a fim de permitir entrada de água em seu interior. Em sua extremidade, coloca-se tampa estanque e envolta em material filtrante, como uma manta geotêxtil. A medição é realizada por meio de uma escala ou equipamento, que permite identificar a posição da superfície da água no interior do tubo, que será correspondente ao nível freático. (MACHADO, 2007).

Figura 6 - Esquema do medidor de nível de água



Fonte: (FONSECA, 2003)

2.5. NÍVEIS DE CONTROLE

O estabelecimento dos níveis de controle da instrumentação auxilia na avaliação da segurança da estrutura, permitindo identificar variações dos fatores de segurança relacionados às condições de fluxo e poropressões na fundação e no maciço que possam comprometer sua estabilidade, além de delimitar os limites esperados para cada instrumento.

Para auxiliar nas tomadas de decisão e orientar as ações a serem adotadas após a identificação de uma situação de risco, são empregados os níveis de controle, que permitem classificar o grau de perigo associado (FAGUNDES, 2023). De acordo com a Resolução ANM N° 95 de 07 de fevereiro de 2022, alterada pela Resolução ANM N° 130 de 24 de fevereiro de 2023 e pela Resolução ANM N° 175 de 1° de agosto de 2024, esses níveis devem ser definidos individualmente para cada estrutura, a partir de avaliações de segurança, sendo usualmente classificados nos níveis normal, atenção, alerta e emergência.

Segundo Fagundes (2023), para a verificação dos níveis de controle, são realizadas análises de estabilidade para todas as seções instrumentadas presentes na estrutura, levando em consideração a topografia de cada uma.

2.6. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

De acordo com Soares (1996), os métodos de cálculo de estabilidade de taludes têm como objetivo determinar o nível de solicitação que pode levar uma estrutura a uma condição de ruptura, resultando em diferentes valores de fator de segurança (FS) para diferentes situações e solicitações. Entende-se por fator de segurança um valor numérico da razão entre esforços estabilizantes (resistentes) e esforços instabilizantes (atuantes) (VANMARCKE, 2011). Nesse caso, o fator de segurança é dado pela equação 1.

$$FS = \frac{\sum \text{Forças resistentes}}{\sum \text{Forças atuantes}} \quad (1)$$

Em outros processos o fator de segurança será tomado como a razão entre os momentos devido as forças que atuando sobre a cunha tendem a mantê-la em equilíbrio (resistentes) e os momentos das forças que tendem a instabilizá-la (atuantes) (SOARES, 1996). Nesse caso, o fator de segurança é dado pela equação 2.

$$FS = \frac{\sum \text{Momentos resistentes}}{\sum \text{Momentos atuantes}} \quad (2)$$

A maioria das análises de estabilidade foram desenvolvidas seguindo a abordagem do método do equilíbrio limite (MEL). Thomaz (1984) destaca que a ampla utilização dessa abordagem se dá por três motivos principais: ao nível satisfatório dos seus resultados, a simplicidade do método e, a facilidade e baixo custo para se estimar ou obter os parâmetros de resistência do solo com precisão para o adequado funcionamento do método.

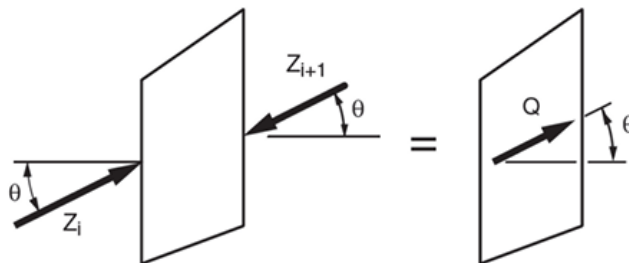
Os métodos de equilíbrio mais frequentemente empregados são Fellenius (1927), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Janbu (1973) e Bishop Simplificado (1995), sendo os métodos de Morgenstern e Price (1965) e de Spencer (1967) considerados os mais rigorosos na análise de estabilidade, pois satisfazem todas as condições de equilíbrio. No presente trabalho, as análises de estabilidade serão realizadas por meio do método de Spencer. Assim, serão apresentadas a seguir suas principais características.

2.6.1. Método de Spencer (1967)

O método desenvolvido por Spencer (1967) é considerado um método rigoroso por satisfazer as três equações de equilíbrio bidimensional. O método define dois fatores de segurança, sendo um calculado em termos de equilíbrios de forças (F_f) e o outro a partir do equilíbrio de momentos (F_m).

Nesse método uma resultante Q é gerada entre as forças de interação entre fatias, gerando uma inclinação constante θ com a horizontal, representado na Figura 7.

Figura 7 - Força resultante da interação entre as fatias - Método de Spencer (1967)



Fonte: (TELLES, 2015)

De acordo com Gerscovich (2016), a resultante Q é calculada a partir das equações de equilíbrio de forças nas direções paralela e normal à base da fatia, descrita na equação 3.

$$Q = \frac{\frac{c'b}{FS} \sec\alpha + \frac{tg\Phi'}{FS} (W \cos\alpha - ub \sec\alpha) W - \sec\alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left\{ 1 + \frac{tg\Phi'}{FS} tg(\alpha - \theta) \right\}} \quad (3)$$

No método de Spencer, a determinação do fator de segurança é realizada a partir de um processo iterativo. Para isso, após o cálculo da força Q , assume-se um valor para θ constante em todas as fatias, e mantendo o FS como incógnita. O fator de segurança final, pelo método de Spencer, é aquele cujo valor de θ resultará no mesmo fator de segurança considerando tanto o equilíbrio de forças quanto o de momentos, substituindo o valor de Q em ambas (TELLES, 2015). Assim, para os diferentes valores de θ adotados, comparam-se os valores de FS até que eles se igualem

$$\sum Q \cos \theta = \sum Q \sin \theta = \sum Q = 0 \quad (4)$$

$$\sum [Q \cos(\alpha - \theta)] = 0 \quad (5)$$

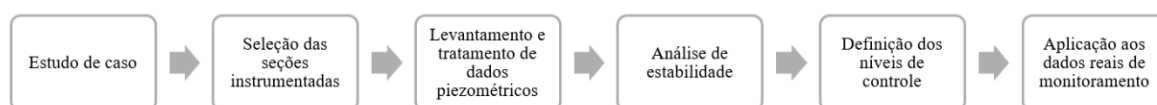
Logo, o fator de segurança obtido para o método de Spencer (1967) é dado pela equação 6.

$$FS = F_f = F_m \quad (6)$$

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi desenvolvida com base na análise dos dados de instrumentação, nas modelagens numéricas e na definição dos níveis de controle piezométricos em um estudo de caso. A Figura 8 apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas para execução do trabalho.

Figura 8 - Etapas do trabalho



Fonte: A autora

3.1. DESCRIÇÃO GERAL DA ESTRUTURA

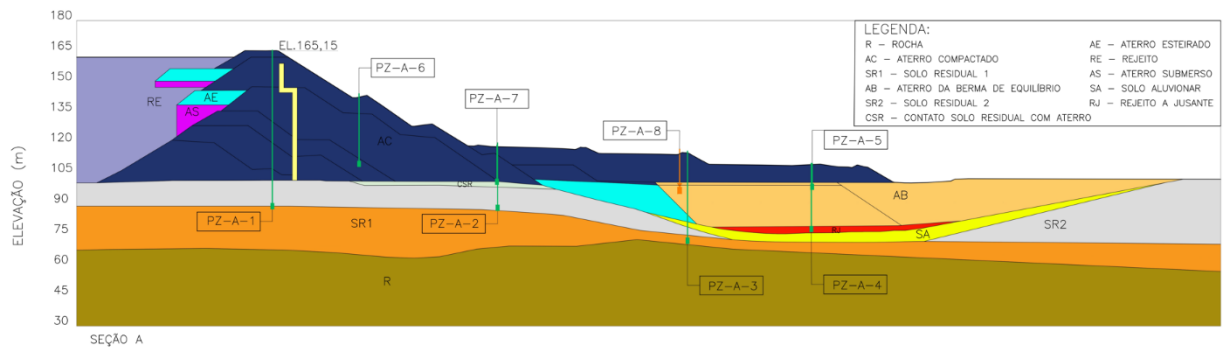
A metodologia do presente trabalho tem como base a análise de dados de instrumentação geotécnica aplicados a um estudo de caso de uma barragem de rejeitos, bem como a definição, aplicação e avaliação dos níveis de controle piezométricos. Inicialmente, foi realizada a organização e interpretação dos dados históricos de monitoramento. Em seguida, realizou-se a etapa de definição dos níveis de controle a partir da análise do comportamento piezométrico observado, associada às análises de fluxo e estabilidade da estrutura. Posteriormente, os níveis definidos foram aplicados aos dados de monitoramento, com o objetivo de avaliar sua contribuição para a interpretação do comportamento da barragem. O estudo foi desenvolvido a partir de dados reais de monitoramento, os quais foram devidamente descaracterizados com o objetivo de preservar a sigilosidade das informações do empreendimento, sem comprometer a consistência técnica das análises realizadas. Dessa forma, não são apresentadas informações que permitam identificação, localização e nomenclaturas originais do empreendimento, sendo a estrutura tratada de forma genérica ao longo do trabalho.

3.2. SEÇÕES ANALISADAS

As seções transversais instrumentadas adotadas para fundamentar as análises neste trabalho, denominadas “Seção A” e “Seção B”, foram escolhidas por concentrarem instrumentos capazes de fornecer informações relevantes sobre o regime de percolação e sobre a variação do nível d’água ao longo do tempo.

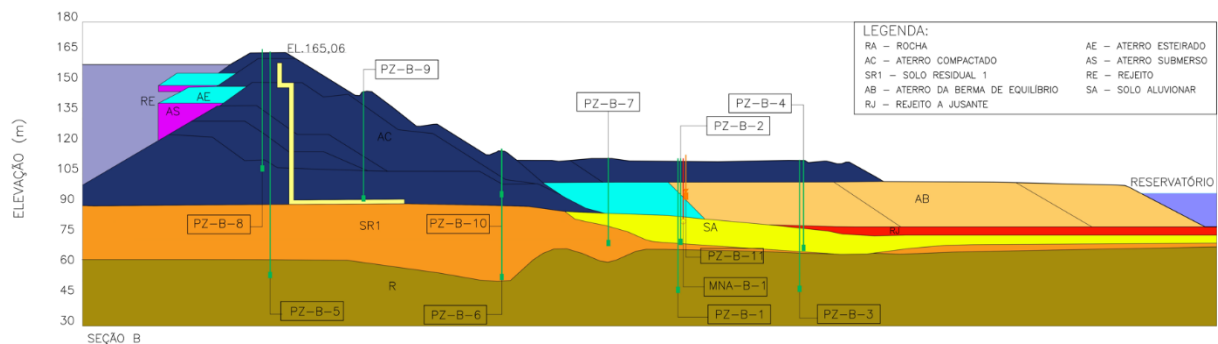
A Seção A da barragem conta com 7 (sete) piezômetros Casagrande e 1 (um) piezômetro elétrico, enquanto a seção B conta com 10 (dez) piezômetros Casagrande, 1 (um) piezômetro elétrico e 1 (um) medidor de nível d'água. A Figura 9 e a Figura 10 apresentam as seções transversais com a indicação da posição dos instrumentos.

Figura 9 - Seção A instrumentada



Fonte: A autora

Figura 10 - Seção B instrumentada



Fonte: A autora

3.3. DADOS CADASTRAIS DA INSTRUMENTAÇÃO

A Tabela 1 apresenta uma síntese contendo informações cadastrais da instrumentação, como profundidade, cota de topo e cota de base.

Tabela 1 – Dados cadastrais da instrumentação nas seções analisadas

Seção	Instrumento	Cota de topo (m)	Prof. (m)	Cota de base (m)
Seção A	PZ-A-1	165,59	26,08	78,24
	PZ-A-2	120,10	11,18	33,54
	PZ-A-3	116,01	15,21	45,63
	PZ-A-4	110,08	11,32	33,96
	PZ-A-5	110,07	4,40	13,20
	PZ-A-6	144,17	12,01	36,03
	PZ-A-7	119,01	6,56	19,68
	PZ-A-8 ⁽¹⁾	116,96	7,30	21,90
Seção B	MNA-B-1	112,67	9,73	29,19
	PZ-B-1	112,67	22,12	66,36
	PZ-B-2	112,67	14,21	42,63
	PZ-B-3	111,96	21,69	65,07
	PZ-B-4	111,96	14,96	44,88
	PZ-B-5	165,42	37,24	111,72
	PZ-B-6	117,35	21,55	64,65
	PZ-B-7	112,99	14,52	43,56
	PZ-B-8	166,61	20,12	60,36
	PZ-B-9	145,84	18,12	54,36
	PZ-B-10	117,42	7,98	23,94
	PZ-B-11 ⁽¹⁾	114,44	7,30	21,90

(1) Piezômetro elétrico de corda vibrante.

Fonte: A autora

3.4. ESTABELECIMENTO DOS NÍVEIS DE CONTROLE

A metodologia adotada para a definição dos níveis de controle foi desenvolvida em duas etapas principais. Os coeficientes de condutividade hidráulica utilizados neste trabalho, apresentados na Tabela 2, foram obtidos a partir de retroanálises de fluxo previamente realizadas pela equipe técnica responsável, com base em leituras de piezômetros e medidores de nível d'água.

Assim, no presente estudo tais parâmetros foram adotados como dados de entrada para as análises de estabilidade, com objetivo de obtenção dos fatores de segurança, não sendo executada nova etapa de calibração. Em seguida, a análise de estabilidade foi realizada considerando a condição normal de operação e uma condição crítica definida para cada seção, a partir da verificação dos fatores de segurança obtidos.

Tabela 2 - Parâmetros geotécnico e hidráulicos utilizados nas análises de estabilidade

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)	Su (kPa)	Su/ σ'_v	Condutividade Hidráulica	
						kx (m/s)	Razão ky/kx
Rocha	21	40	34	-	-	5,00x10 ⁻⁷	1
Solo Residual 1	20	0	33	-	-	5,00x10 ⁻⁷	1
Solo Residual 2	19	0	29	-	-	5,00x10 ⁻⁷	1
Solo Aluvionar	18	-	-	20 (constante)	-	1,00x10 ⁻⁸	1
Contato Solo Residual com Aterro	18	-	-	15	0,26	1,00x10 ⁻⁸	1
Aterro Compactado	20	16	32	-	-	5,00x10 ⁻⁸	0,2
Aterro Esteirado	19	-	-	20	0,50	1,00x10 ⁻⁷	1
Aterro Submerso	16	-	-	16 (constante)	-	5,00x10 ⁻⁸	1
Aterro da Berma de Equilíbrio	19	-	-	20	0,50	5,00x10 ⁻⁸	1
Rejeito de Montante	16	-	-	-	0,144	1,00x10 ⁻⁸	1
Rejeito de Jusante	16	-	-	20 (constante)	-	1,00x10 ⁻⁸	1
Filtro	18	0	32	-	-	1,00x10 ⁻⁴	1

Fonte: Acervo da empresa

Nota: As análises de estabilidade foram realizadas adotando o critério de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb. Para os materiais drenados foram utilizados os parâmetros c'e ϕ , enquanto para os materiais não drenados foram adotados valores de resistência não drenada Su ou relações Su/ σ'_v (Vertical Stress Ratio).

3.4.1. Condições de contorno

A partir da metodologia proposta e dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos dos materiais obtidos a partir das retroanálises, foram realizadas análises de fluxo associadas às análises de estabilidade para a condição normal de operação e as condições críticas da barragem. Para a definição das pressões neutras no maciço, as linhas freáticas foram inseridas manualmente no modelo, com base na interpretação do comportamento hidráulico esperado da estrutura e nas condições de drenagem consideradas em cada cenário analisado.

Os seguintes cenários foram considerados:

- a) Condição normal de operação: Nessa condição, considerou-se o funcionamento normal do sistema de drenagem, com condutividade hidráulica de 1×10^{-4} m/s. Adicionalmente, foi considerado o nível d'água do reservatório a jusante da barragem correspondente ao nível máximo normal de operação, correspondente a elevação 95,46 m.
- b) Condição crítica: Nessa condição, considerou-se o funcionamento ineficiente do sistema de drenagem, com condutividade hidráulica de 1×10^{-8} m/s.

Dessa forma, a consideração das condições normal e crítica permitiu avaliar a estabilidade da barragem em diferentes cenários operacionais.

3.4.2. Análise de estabilidade

As análises de estabilidade foram realizadas com o objetivo de determinar os fatores de segurança das seções analisadas. Os fatores de segurança obtidos foram utilizados para a verificação dos cenários adotados e para a interpretação dos níveis de controle piezométricos estabelecidos. As simulações foram desenvolvidas no software Slide2, empregando o Método do Equilíbrio Limite (MEL), por meio do método de Spencer, por se tratar de um método completo, uma vez que satisfaz simultaneamente todas as equações de equilíbrio de forças e de momentos.

O estabelecimento dos níveis de controle permite, por meio de associação a fatores de segurança, avaliar a condição de segurança das estruturas quanto à estabilidade dos taludes, frente a possíveis elevações das poropressões internas nos maciços ou fundações. É válido ressaltar que a norma brasileira não estabelece os valores dos fatores de segurança que compõem as faixas de segurança. Para este trabalho, os valores da faixa de variação do fator de segurança, apresentados na Tabela 3, são sugeridos com base critérios usualmente empregados na prática da engenharia geotécnica para análises de estabilidade, as quais usualmente indicam fatores mínimos da ordem de 1,50 para condição normal de operação e 1,30 para condição crítica.

Tabela 3 - Faixa de variação do fator de segurança adotado

Nível de Controle	Faixa de Variação dos FS
Normal	$1,50 \leq FS$
Atenção	$1,30 \leq FS < 1,50$
Alerta	$1,10 \leq FS < 1,30$
Emergência	$FS < 1,10$

Fonte: A autora

Cabe ressaltar que os parâmetros de permeabilidade indicados na Tabela 2 representam um valor médio utilizado nas análises. Ainda, destaca-se que, para os seguintes materiais, foram atribuídos parâmetros não-drenados: solo aluvionar, contato solo residual com aterro, aterro esteirado, aterro submerso, aterro da berma de equilíbrio e rejeito. Aos demais materiais (rocha alterada, solo residual 1 e 2, aterro compactado e filtro) foram atribuídos parâmetros efetivos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. NÍVEIS DE CONTROLE

Na Tabela 4 estão apresentados os níveis de controle estabelecidos para a instrumentação das seções A e B, conforme metodologia e condições anteriormente descritas, enquanto a Figura 11 a Figura 18 ilustram as análises de estabilidade na condição normal de operação e nas condições críticas empregadas para a definição dos níveis de controle da barragem de rejeitos em estudo.

Tabela 4 - Níveis de controle obtidos para as seções A e B

Seção	Instrumento	Cota de topo (m)	Normal $1,50 \leq FS$	Atenção $1,30 \leq FS < 1,5$	Alerta $1,10 \leq FS < 1,30$	Emergência $FS < 1,10$
Seção A	PZ-A-1	165,59	< 120,12	120,12	131,46	139,71
	PZ-A-2	120,10	< 114,99	114,99	120,09	120,09
	PZ-A-3	116,01	< 110,43	110,43	113,91	116,01
	PZ-A-4	110,08	< 107,13	107,13	108,99	110,07
	PZ-A-5	110,07	< 106,80	106,80	108,27	109,56
	PZ-A-6	144,17	< 120,36	120,36	129,00	134,79
	PZ-A-7	119,01	< 115,08	115,08	119,01	119,01
	PZ-A-8	116,96	< 110,46	110,46	112,92	116,04
Seção B	MNA-B-1	112,67	-	-	-	-
	PZ-B-1	112,67	< 111,18	111,18	112,68	112,68
	PZ-B-2	112,67	< 111,18	111,18	112,68	112,68
	PZ-B-3	111,96	< 107,43	107,43	109,77	111,96
	PZ-B-4	111,96	< 107,34	107,34	109,23	111,96
	PZ-B-5	165,42	< 122,04	122,04	138,57	145,35
	PZ-B-6	117,35	< 116,13	116,13	117,36	117,36
	PZ-B-7	112,99	< 112,98	112,98	112,98	112,98
	PZ-B-8	166,61	< 128,13	128,13	142,14	147,45
	PZ-B-9	145,84	< 119,94	119,94	132,87	141,51
	PZ-B-10	117,42	< 115,95	115,95	117,42	117,42
	PZ-B-11	114,44	< 110,61	110,61	114,12	114,44

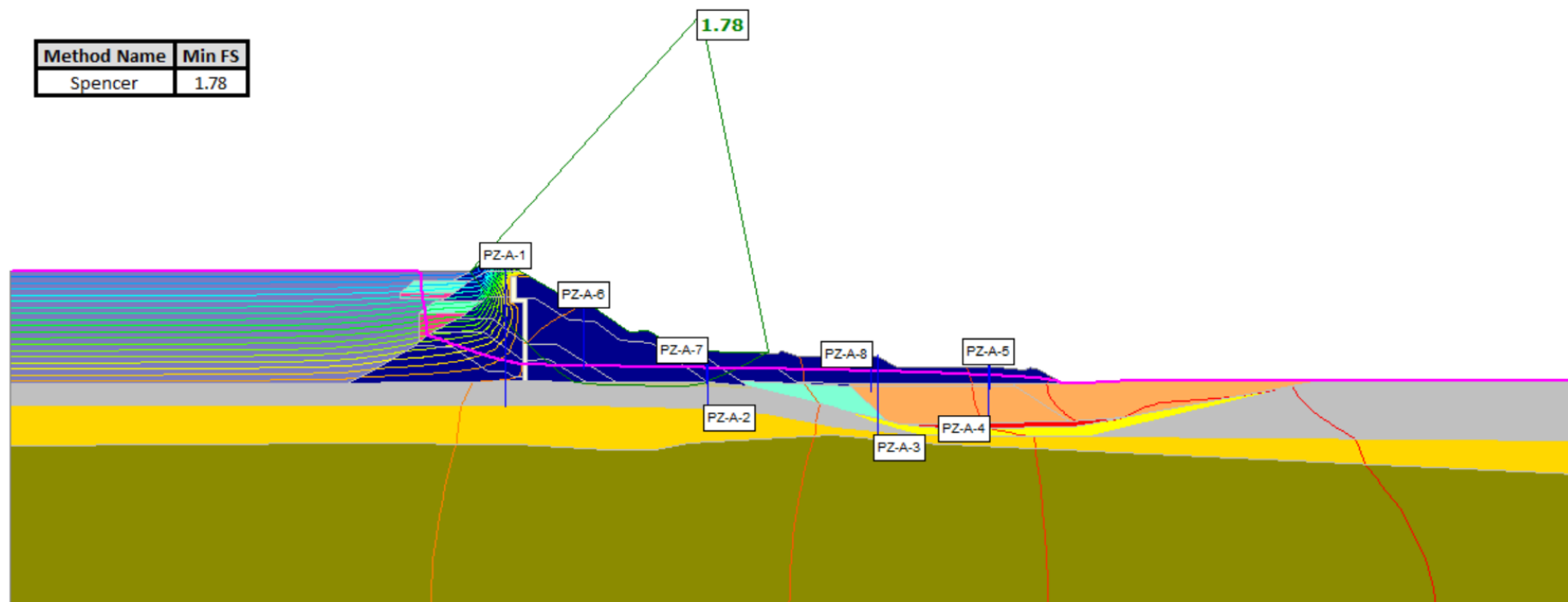
Fonte: A autora

Os resultados apresentados na Tabela 4 evidenciam que os níveis de controle variam significativamente entre os instrumentos e entre as seções A e B, refletindo as particularidades geométricas, hidráulicas e geotécnicas de cada região da barragem. Observa-se que, para determinados piezômetros, especialmente aqueles instalados em cotas mais elevadas ou em regiões potencialmente mais sensíveis ao aumento de poropressões (como PZ-A-1, PZ-A-6, PZ-B-5, PZ-B-8 e PZ-B-9), os intervalos entre os níveis Normal, Atenção, Alerta e Emergência são mais amplos. Esse comportamento indica maior influência da variação do regime de fluxo na redução do fator de segurança, exigindo faixas de controle bem definidas para permitir a identificação antecipada de cenários críticos.

Em contrapartida, instrumentos como PZ-B-7 e PZ-B-6 apresentam pequena diferença entre as faixas estabelecidas, sugerindo que pequenas elevações do nível piezométrico já são suficientes para impactar significativamente na estabilidade local.

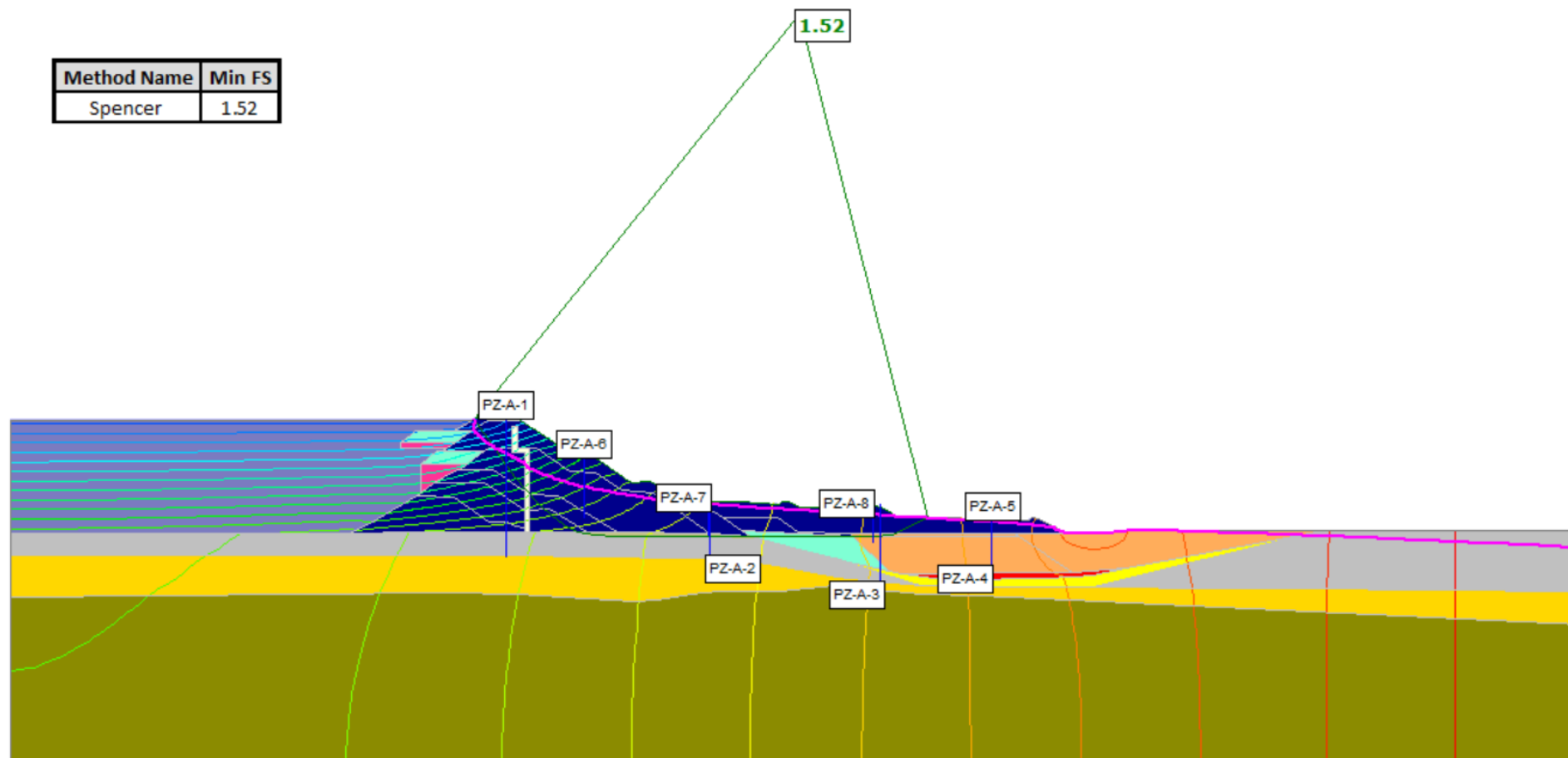
Verifica-se ainda que, em diversos instrumentos, os valores associados às condições de Alerta e Emergência coincidem ou se aproximam significativamente da cota de topo, o que reforça a coerência física dos resultados obtidos nas análises de estabilidade. Essa proximidade indica que a elevação excessiva das poropressões tende a conduzir a uma condição limite compatível com a saturação ou com o máximo carregamento hidráulico admissível naquela seção.

Figura 11 - Seção A – Condição normal operacional



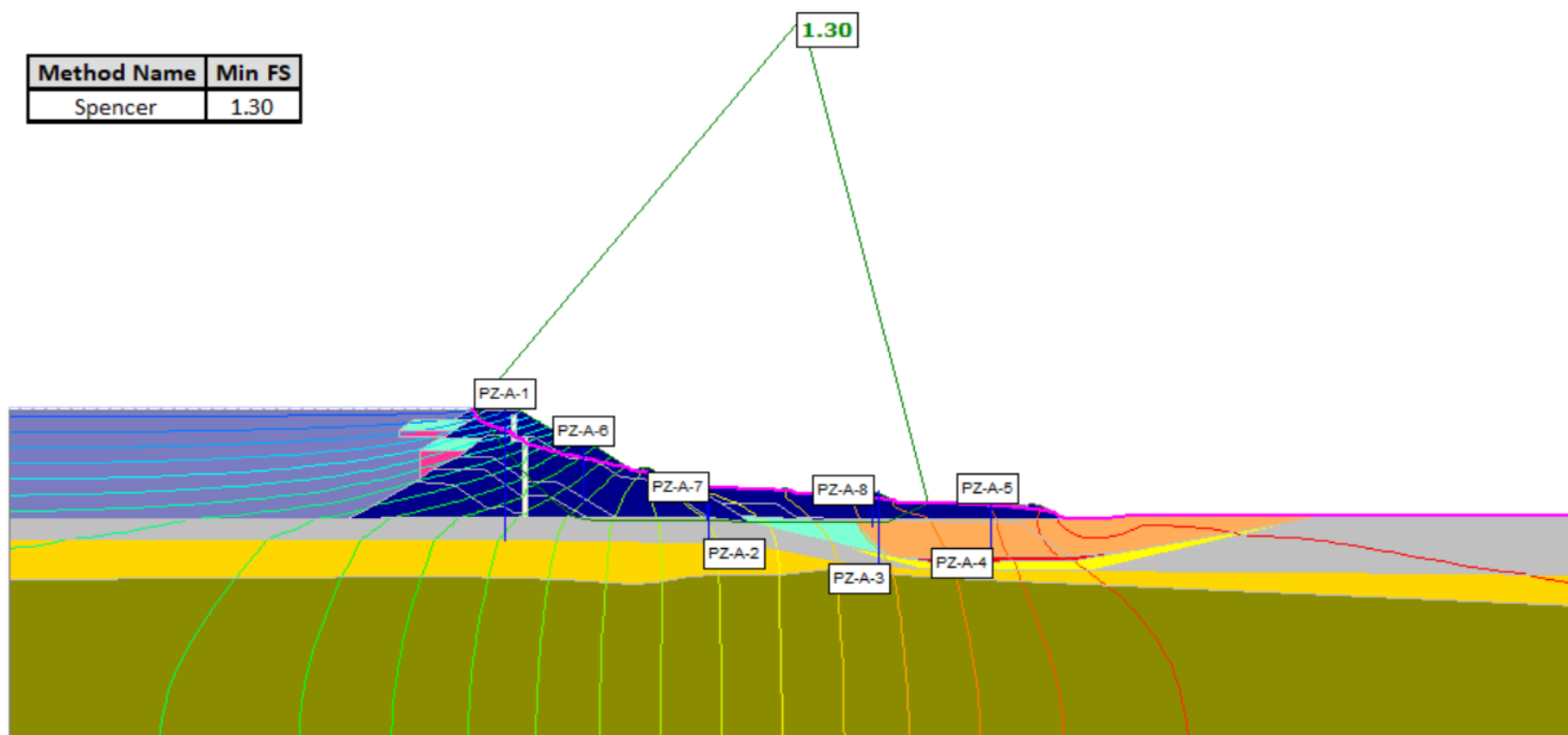
Fonte: A autora

Figura 12 - Seção A – Condição crítica: nível de atenção



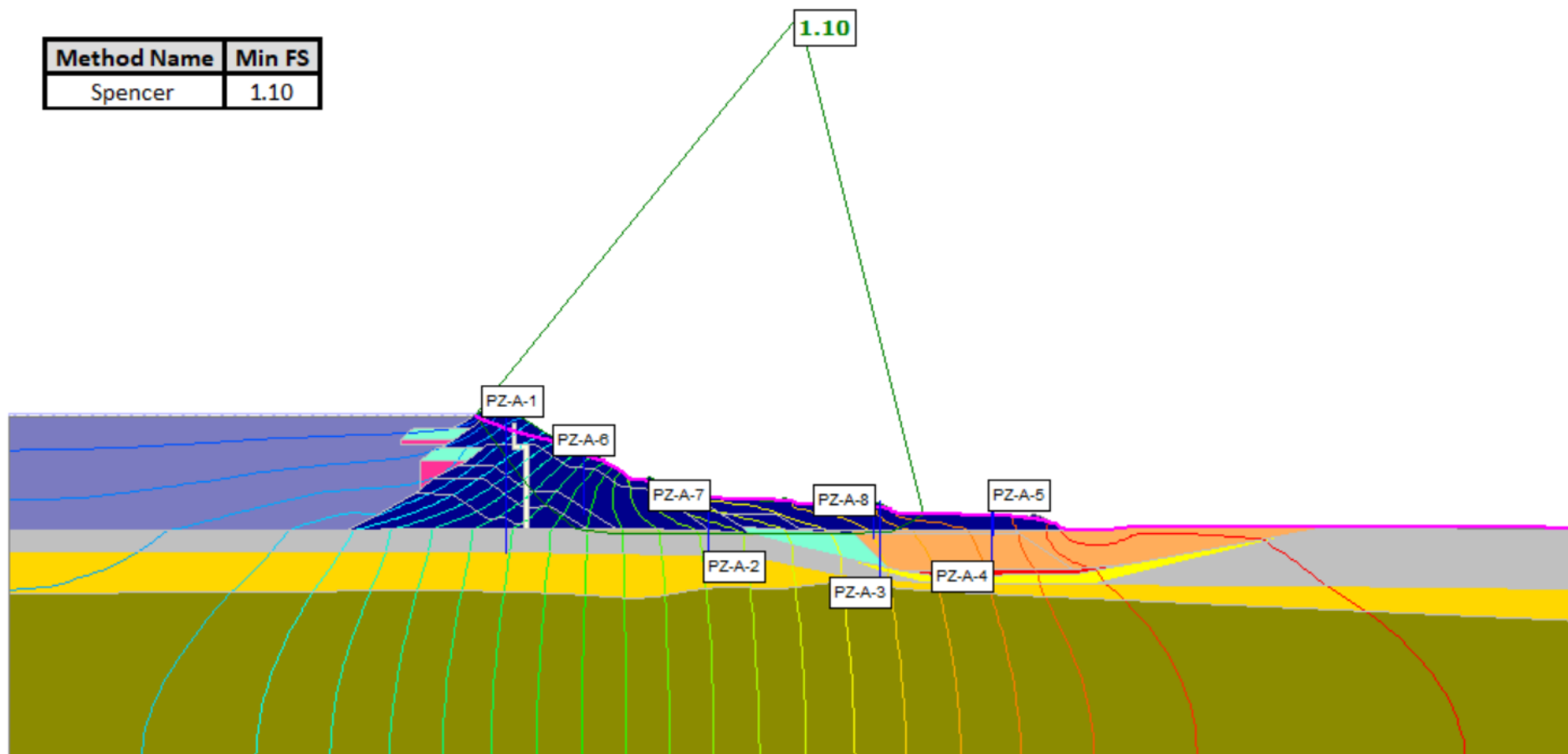
Fonte: A autora

Figura 13 - Seção A – Condição crítica: nível de alerta



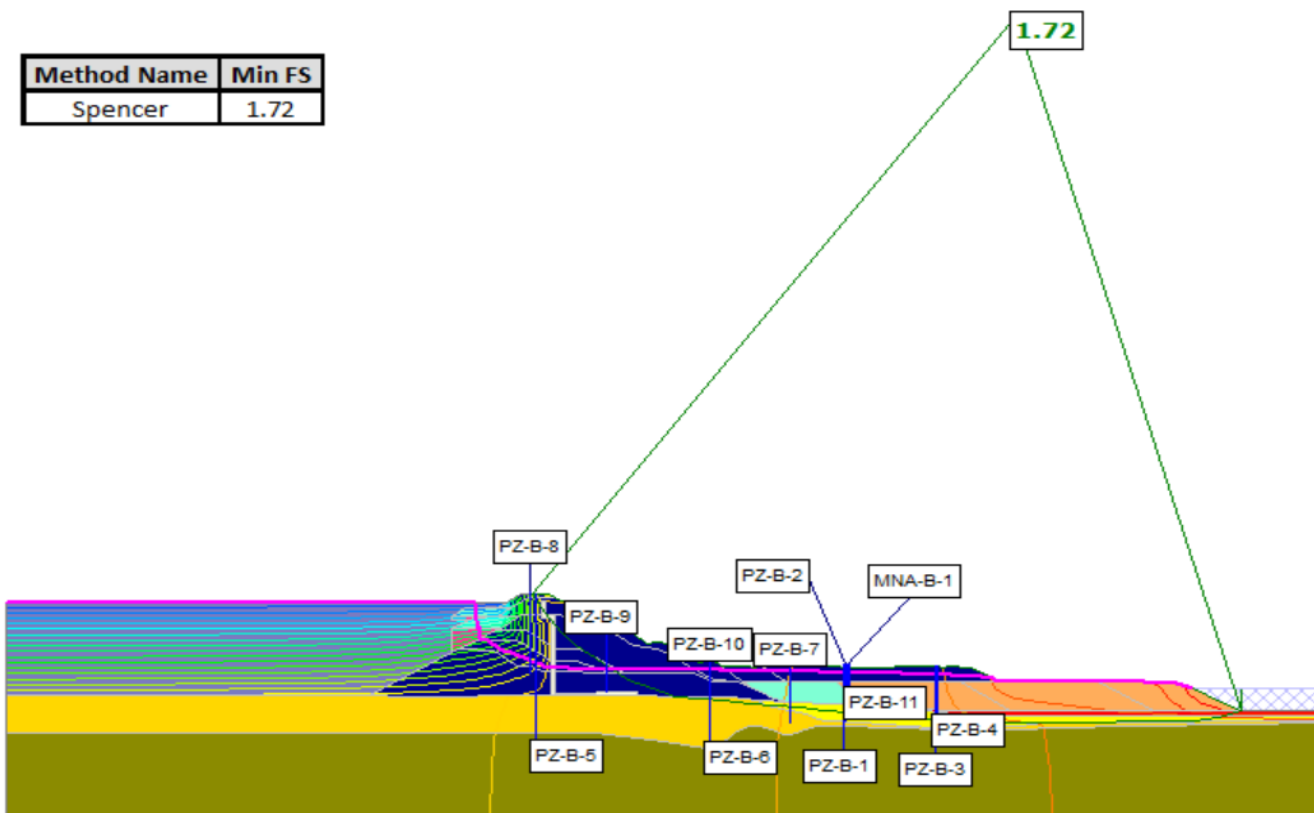
Fonte: A autora

Figura 14 - Seção A – Condição crítica: nível de emergência



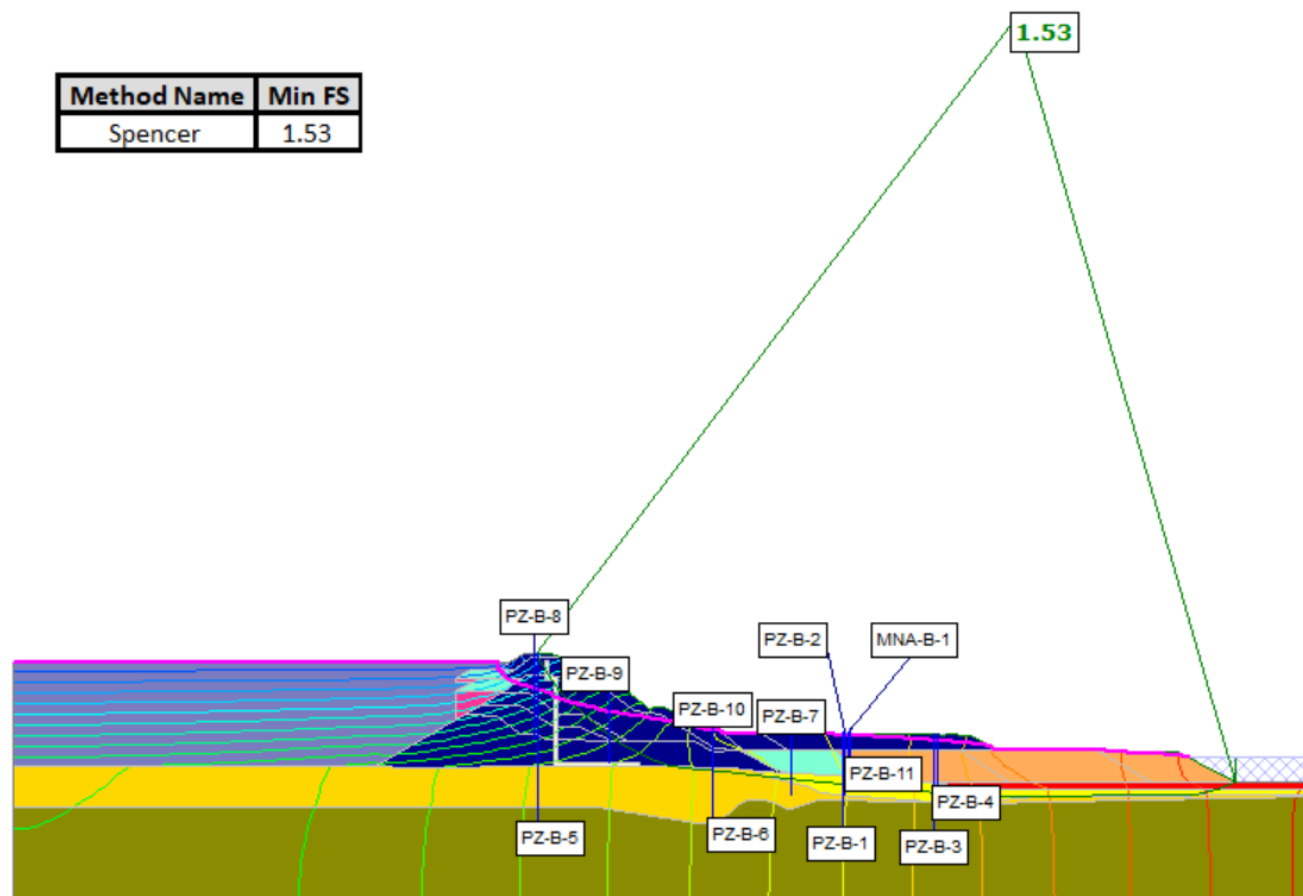
Fonte: A autora

Figura 15 - Seção B – Condição normal operacional



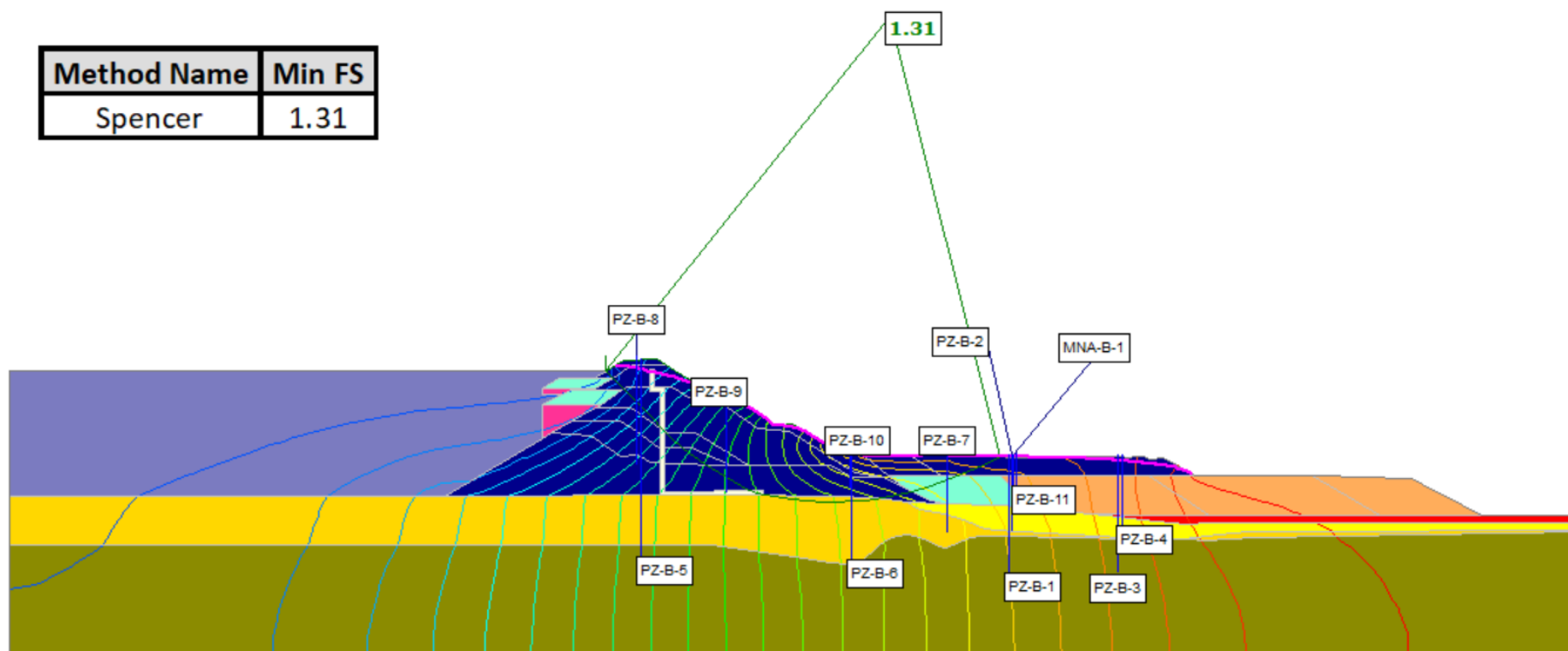
Fonte: A autora

Figura 16 - Seção B – Condição crítica: nível de atenção



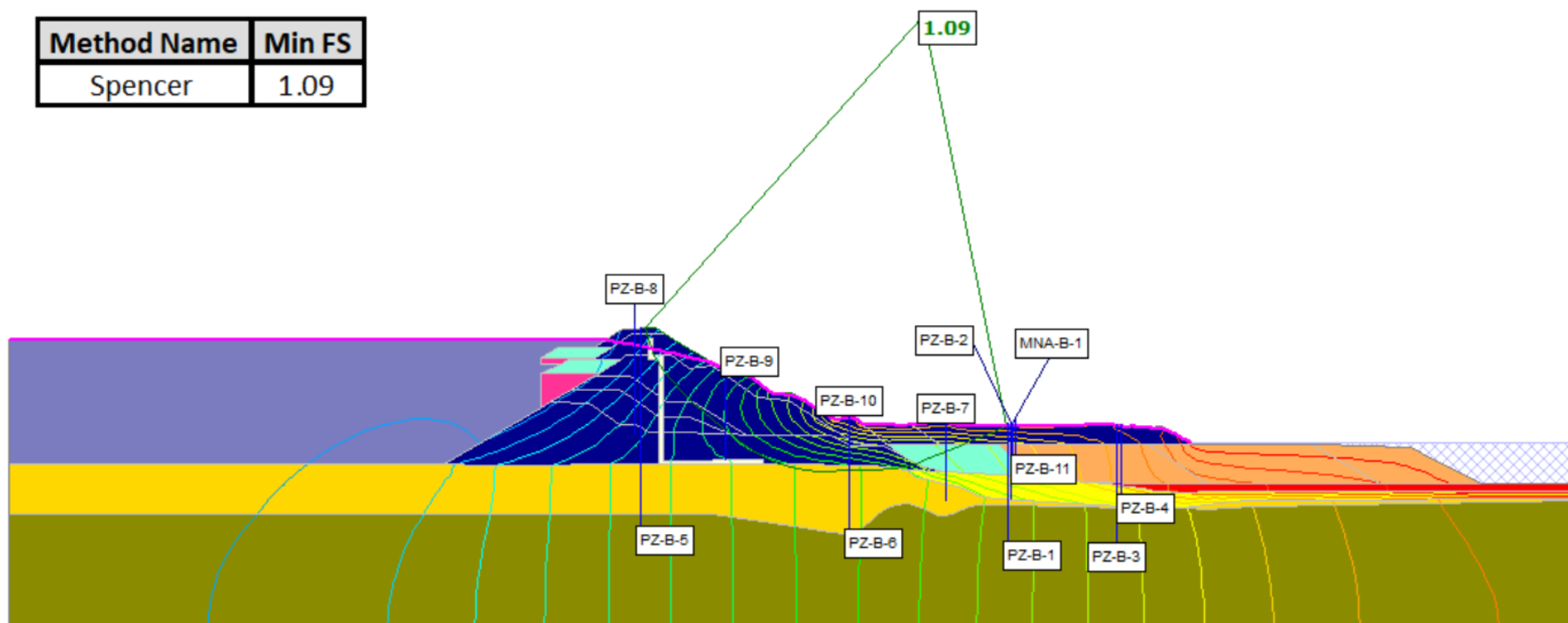
Fonte: A autora

Figura 17 - Seção B – Condição crítica: nível de alerta



Fonte: A autora

Figura 18 - Seção B – Condição crítica: nível de emergência



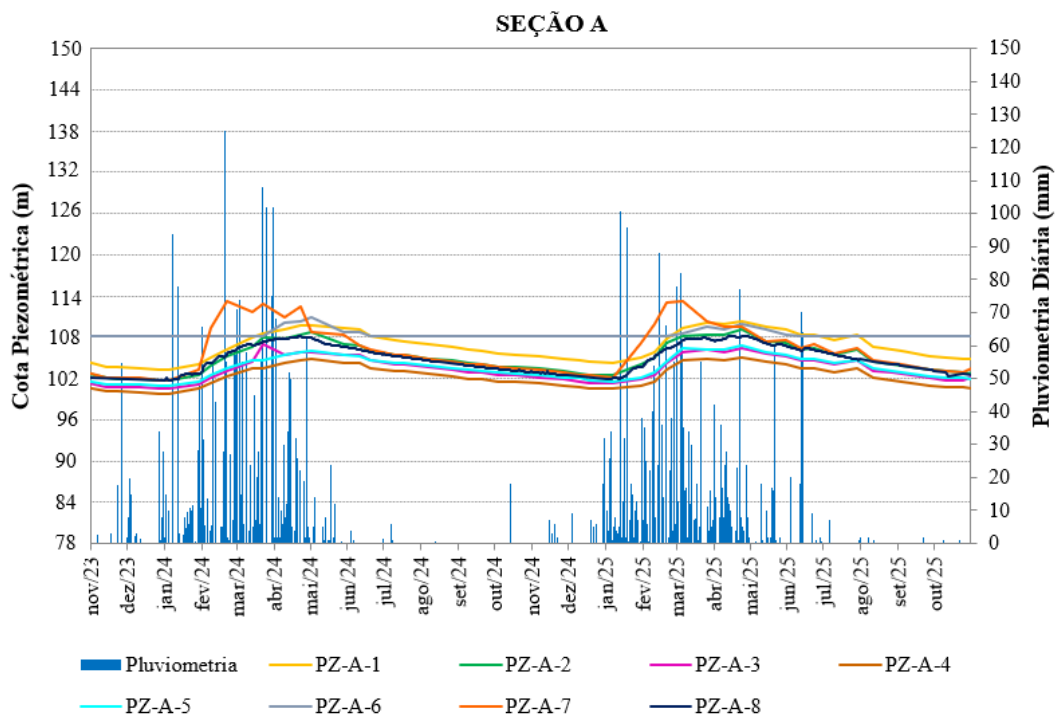
Fonte: A autora

4.2. ANÁLISE DE DADOS

As leituras dos instrumentos foram realizadas manualmente em campo, com periodicidade quinzenal, considerando um período de estudo entre novembro de 2023 e outubro de 2025, com objetivo de analisar diferentes condições sazonais. Os dados de pluviometria foram obtidos com registros diários ao longo do mesmo período. Os dados coletados foram organizados em planilhas contendo as informações apresentadas na Tabela 1.

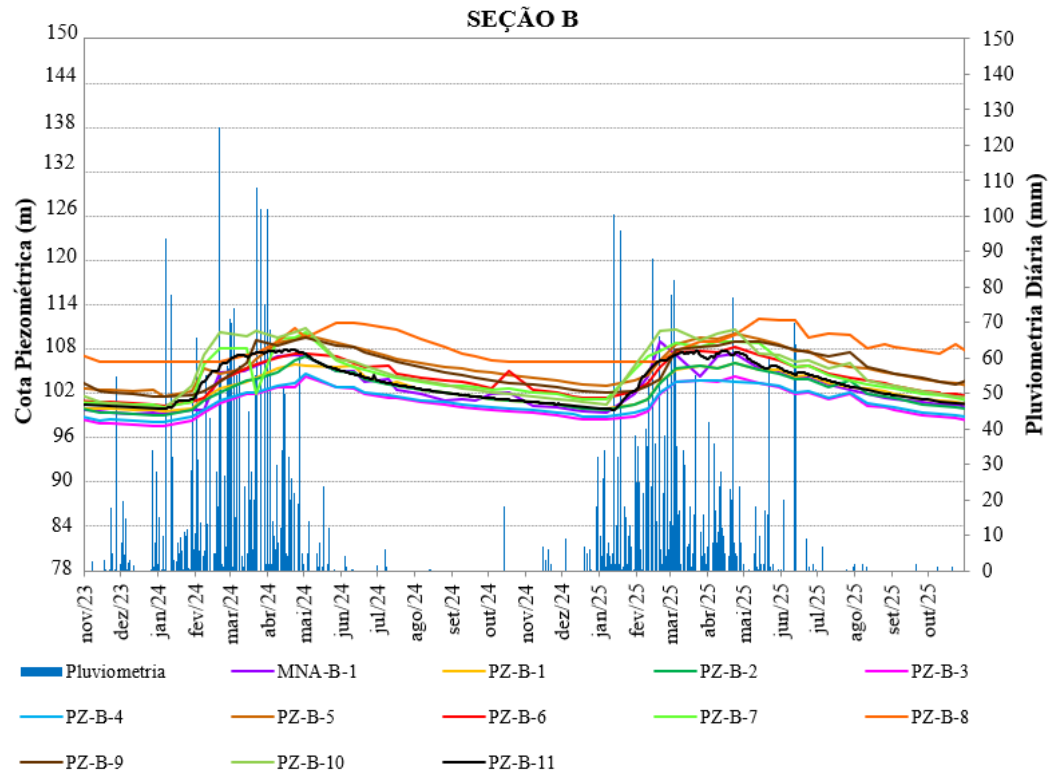
Com os dados tratados e organizados, foram gerados gráficos que sintetizam o histórico de monitoramento com a representação das leituras dos instrumentos. A Figura 19 e a Figura 20 apresentam os gráficos obtidos para a Seção A e Seção B, respectivamente.

Figura 19 - Pluviometria diária e cotas piezométricas dos instrumentos – Seção A



Fonte: A autora

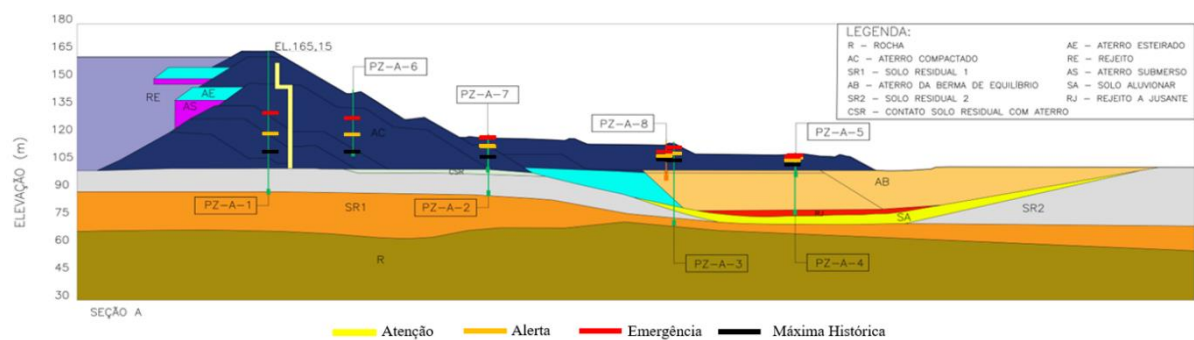
Figura 20 - Pluviometria diária e cotas piezométricas dos instrumentos – Seção B



Fonte: A autora

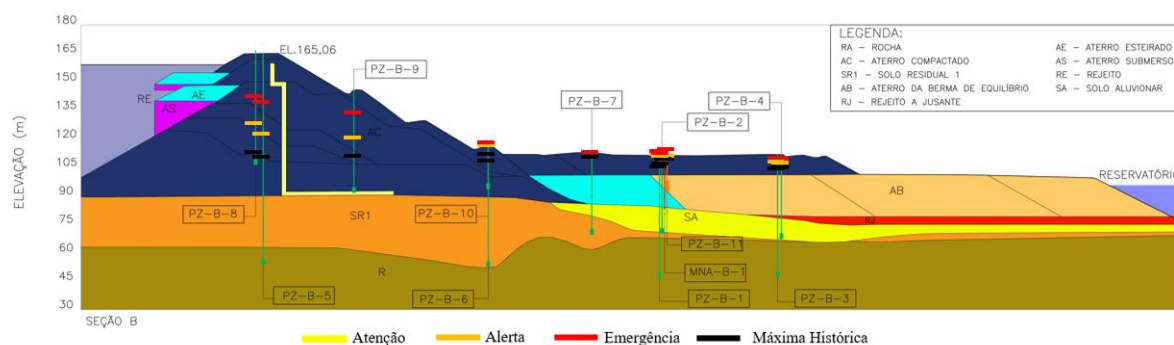
A análise dos gráficos foi complementada por uma avaliação da representação das seções transversais instrumentadas, apresentadas na Figura 21 e na Figura 22. Nessa abordagem, as leituras máximas observadas no período analisado foram comparadas aos níveis de controle estabelecidos para cada instrumento.

Figura 21 - Níveis de controle e máximas históricas – Seção A



Fonte: A autora

Figura 22 - Níveis de controle e máximas históricas - Seção B



Fonte: A autora

4.2.1. Pluviometria e cotas piezométricas

A análise da pluviometria teve como objetivo verificar a influência dos eventos de precipitação no comportamento piezométrico da barragem. Os dados de pluviometria diária foram analisados de forma integrada às leituras dos piezômetros, de modo a identificar possíveis correlações entre períodos de maior precipitação e elevação dos níveis d'água.

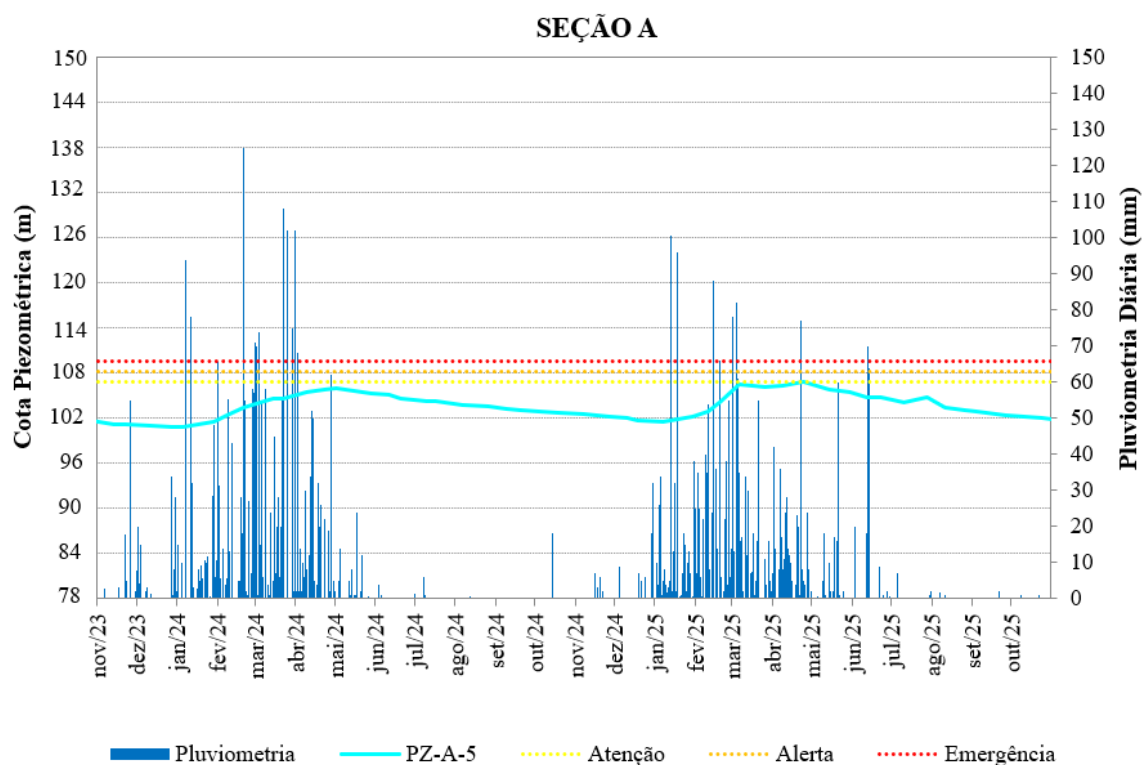
O maior evento chuvoso diário observado no período de análise ocorreu em 20/02/2024, em que foi registrada precipitação de 125,00 mm. Destaca-se que, de forma geral, a pluviometria apresenta um comportamento sazonal bem definido, com maiores índices pluviométricos no primeiro semestre, principalmente entre janeiro e abril, seguido de redução significativa das chuvas no segundo semestre do ano. Esse padrão se repete em todo o período de análise, caracterizando períodos chuvosos e de estiagem bem definidos.

A análise das leituras piezométricas teve como objetivo identificar os valores máximos registrados ao longo do período de monitoramento. As leituras máximas observadas foram comparadas aos níveis de controle definidos para cada instrumento, permitindo avaliar a proximidade das cargas piezométricas em relação aos limites de atenção, alerta e emergência. O histórico de leituras dos piezômetros indica, de modo geral, um comportamento similar entre os instrumentos, com tendência à elevação das leituras nos períodos chuvosos e redução em períodos de estiagem. Sendo assim, os piezômetros sofrem influência das precipitações pluviométricas.

Ressalta-se que, o instrumento PZ-A-5, instalado na fundação da seção A, atingiu o nível de atenção estabelecido na carta de risco no dia 24/04/2025, com carga piezométrica na ordem de 106,86 m.c.a, conforme apresentado na Figura 23. Esse comportamento ocorreu de forma

pontual e, nas leituras subsequentes, os valores retornaram à condição normal do instrumento, indicando a normalização do comportamento piezométrico.

Figura 23 - Histórico das leituras piezométricas do piezômetro PZ-A-5 com indicação dos níveis de controle – Seção A



Fonte: A autora

Destaca-se que não houve evolução das leituras para os níveis de alerta ou emergência, nem a continuidade no nível de atenção. Uma leitura individual em nível de atenção pode não significar que toda a barragem e todas as seções estejam em nível de atenção. Porém, tal leitura deve ser interpretada a fim de manter a segurança da estrutura em nível adequado. Dessa forma, o comportamento observado não indica comprometimento da segurança da estrutura, mas reforça a importância do acompanhamento contínuo e da análise integrada dos dados de instrumentação para a identificação de variações atípicas e adoção de medidas corretivas e/ou preventivas em tempo hábil, se necessário.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo definir níveis de controle para a instrumentação de uma barragem de rejeitos, avaliando sua contribuição para a verificação da segurança da estrutura e eficiência do monitoramento geotécnico. A aplicação desses níveis aos dados de monitoramento demonstrou sua eficácia como ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo a identificação de variações relevantes no comportamento piezométrico.

A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar que a definição dos níveis de controle é uma ferramenta relevante para a gestão da segurança de barragens de rejeitos, contribuindo para a interpretação adequada dos dados de instrumentação e para o monitoramento da estrutura. Ressalta-se que os níveis de controle não devem ser utilizados de forma isolada, mas sim em conjunto com a análise do histórico das leituras, permitindo uma interpretação mais consistente do comportamento da estrutura.

Através da análise de dados históricos de monitoramento, foi possível observar que os instrumentos apresentaram leituras estáveis e sem grandes variações, conforme apresentado nos gráficos que sintetizam o histórico de monitoramento com a representação das leituras dos instrumentos. Destaca-se que apenas o instrumento PZ-A-5 atingiu pontualmente uma leitura na faixa de atenção. Porém, uma leitura isolada de um valor em nível de atenção não implica, necessariamente, condição crítica da barragem, devendo ser avaliada junto a outros dados.

Cabe destacar que a metodologia aplicada apresenta certas limitações. Os níveis de controle estabelecidos estão relacionados ao modo de falha de instabilização, associando-se às condições de poropressões do maciço e da fundação com fatores de segurança limites pré-estabelecidos. Portanto, não é possível mensurar diretamente, por meio destes níveis, os riscos associados a outros modos de falha, como erosão interna, por exemplo.

Por fim, destaca-se que a metodologia apresentada pode ser utilizada como referência para estudos semelhantes em outras barragens de rejeitos, desde que sejam consideradas as características específicas de cada estrutura, como as propriedades geotécnicas dos materiais, as condições hidráulicas e o histórico de operação. A adaptação da metodologia às condições de cada barragem é importante para garantir que os níveis de controle representem de forma adequada o comportamento esperado da estrutura. Nesse contexto, recomenda-se que trabalhos futuros avaliem a aplicação dessa abordagem em outras barragens, bem como a integração com

diferentes tipos de instrumentação e métodos de análise, contribuindo para ampliar o entendimento sobre o comportamento dessas estruturas e para o aprimoramento das práticas de monitoramento e gestão da segurança de barragens.

REFERENCIAS

ABNT. NBR 13028 - Mineração: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro - RJ, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Definições Importantes sobre Segurança de Barragens. Brasília, DF. 2022.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone. 2004.

AFFONSO, H. M. M. Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 35, 2004.

ANM. RESOLUÇÃO Nº 4, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2019. Diário Oficial da União, 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056>. Acesso em: 06 Janeiro 2026.

ANM. RESOLUÇÃO Nº 95, DE 07 DE FEVEREIRO DE 2022. GOV, 2022. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>>. Acesso em: 06 Janeiro 2026.

ANM. RESOLUÇÃO Nº 130, DE 24 DE FEVEREIRO DE 2023. GOV, 2022. Disponível em: <https://anmlegis.datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao=abrirTextoAto&link=S&tipo=RES&numeroAto=00000130&seqAto=000&valorAno=2023&orgao=ANM/MME&cod_modulo=566&cod_menu=8303>. Acesso em: 06 Janeiro 2026.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, DF: Casa Civil, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm. Acesso em: 30 dez. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Institui normas para a segurança de barragens, estabelece diretrizes para a fiscalização e a gestão de riscos 56 associados e altera

dispositivos da legislação mineral. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/leis/lei-n-14-0662020.pdf/view>. Acesso em: 30 dez. 2025.

DE FREITAS MACHADO, W. G. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. 2007. Tese de Doutorado.

DE MATTOS TELLES, A. C. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE ROMPIDO NA RODOVIA RJ 130, TERESÓPOLIS, RJ. 2015. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DE OLIVEIRA, A. S.; GUIMARÃES, M. M. Monitoramento geotécnico da barragem de terra de uma pequena central hidrelétrica–pch no estado de minas gerais.

DUARTE, A. P. Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. 2008.

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

FAGUNDES, P. G. M. Análise dos dados do monitoramento de uma barragem de rejeitos. 2023. Repositório Institucional, Universidade Federal de Catalão, Catalão, Brazil, 2023.

FONSECA, A. R. Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica–estudo de caso das barragens da UHE São Simão. Repositório Institucional, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil, 2003.

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.

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
PEREIRA, D. M. Retroanálise de talude rodoviário – abordagens determinísticas e probabilística. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2022.

LOPES, A. B. F. Análise de estabilidade de barragem com base na instrumentação piezométrica e dados pluviométricos: um estudo de caso. Repositório Institucional, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil, 2024.

MACHADO, W. G. F. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. 2007. Tese de Doutorado.

MASSAD, F. Obras de Terra - Curso básico de Geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

NEVES, L. P. Segurança de Barragens—Legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada. E-book. Acesso em: Janeiro, v. 1, p. 2019, 2018.

OLIVEIRA, J. C. Gestão operacional das barragens de terra do complexo minerário das minas de ferro Carajás da VALE. 2014.

PENNA, D. C. R. et al. Carta de Risco como ferramenta na gestão de segurança de barragens. In: SEMINÁRIO DE GESTÃO DE RISCOS E SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO, 2., 2017, Belo Horizonte: CBDC, 2017.

THOMAZ, J. E. S. Rotina de geração randômica de superfícies críticas na análise de estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 1984.

VICK, S. G. Planning, design, and analysis of tailings dams., 1983.