UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN

FRANCISCO MOREIRA MINDÊLLO

DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE DE PIEZÔMETROS E MEDIDORES DE NÍVEL D'ÁGUA DE UMA BARRAGEM: UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA

Ouro Preto – MG
2024

FRANCISCO MOREIRA MINDÊLLO

DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE DE PIEZÔMETROS E MEDIDORES DE NÍVEL D'ÁGUA DE UMA BARRAGEM: UMA ABORDAGEM ESTATÍSTICA

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.
Orientadora: Prof. Dra. Tatiana Barreto dos Santos.

Ouro Preto – MG
2024

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

Francisco Moreira Mindêllo

Definição dos níveis de controle de piezômetros e medidores de nível d'água de uma barragem: uma abordagem estatística

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 03 de outubro de 2024

Membros da banca

Drª Tatiana Barreto dos Santos - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr Hernani Mota de Lima - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr Daniel Silva Jaques - Universidade Federal de Ouro Preto

Tatiana Barreto dos Santos, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/10/2024

Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Barreto dos Santos**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/10/2024, às 10:35, 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 **0795850** e o código CRC **267EC7DE**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591590 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Paulo e Carolina, por sempre me apoiarem nas minhas escolhas e me motivarem para seguir em busca dos meus sonhos.
À Escola de Minas e a Fundação Gorceix, pelo ensino gratuito e de qualidade
Ao DEMIN e aos professores, pelos ensinamentos valiosos compartilhados ao longo da jornada.
À minha orientadora, Professora Tatiana Barreto dos Santos, pelo apoio essencial na realização deste trabalho.
À BVP Geotecnia e Hidrotécnica pela oportunidade de crescimento profissional e todos os profissionais que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.
À eterna República Verdes Mares, por todos os ensinamentos e ter se tornado minha segunda família.
Por fim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram para esta conquista.

RESUMO

Este trabalho analisa dados históricos de leituras de indicadores de nível d'água e piezômetros, propondo uma metodologia para a definição de níveis de controle baseada em uma análise estatística vinculada ao comportamento histórico da instrumentação. Essa análise foi realizada utilizando fórmulas estatísticas desenvolvidas no Microsoft Excel. A definição de níveis de controle – normal, alerta, atenção e emergência – para cada equipamento permite a tomada de decisões preventivas, priorizando a segurança da estrutura, das comunidades e do meio ambiente. Os resultados obtidos demonstraram coerência com o comportamento histórico de cada instrumento, revelando-se viáveis para aplicação na barragem estudada. Este estudo complementa as metodologias comumente empregadas na definição de níveis de controle, oferecendo uma alternativa para a adoção de valores mais restritivos.

Palavras-chave:
Piezômetros; indicadores de nível d’água; análise estatística; barragem de mineração; monitoramento.

A B S T R A C T

This study analyzes historical data from water level indicators and piezometers, proposing a methodology for defining control levels based on a statistical analysis linked to the historical behavior of the instrumentation. This analysis was conducted using statistical formulas developed in Microsoft Excel. The definition of control levels – normal, alert, attention, and emergency – for each instrument enables preventive decision-making, prioritizing the safety of the structure, nearby communities, and the environment. The results obtained were consistent with the historical behavior of each instrument, proving viable for application to the dam studied. This study complements commonly used methodologies for defining control levels, offering an alternative for the adoption of more restrictive values.

Keywords: Piezometers; water level indicators; statistical analysis; mining dams; monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de um piezômetro de tubo aberto 16
Figura 2: Esquema de um piezômetro de corda vibrante 17
Figura 3: Esquema de um piezômetro pneumático 18
Figura 4: Esquema de um piezômetro elétrico 19
Figura 5: Esquema de um indicador de nível d'água 20
Figura 6: Zona de inconsistência e consistência 26
Figura 7 - Planta da Barragem em estudo 29
Figura 8 - Planta de instrumentação da Barragem Piloto – locação dos PZ's e INA's 31
Figura 9 – Seção AA' Instrumentada 32
Figura 10 - Seção BB' Instrumentada 32
Figura 11 - Seção CC' Instrumentada 33
Figura 12 – Fluxograma da metodologia 34
Figura 13 - Nível do reservatório durante os 4 anos amostrais 37
Figura 14 – Leituras pluviômetro 37
Figura 15 – Leituras do Instrumento PZ03 38
Figura 16 – Leituras do Instrumento PZ04 38
Figura 17 – Leituras do Instrumento PZ05 39
Figura 18 – Leituras do Instrumento PZ06 39
Figura 19 – Leituras do Instrumento PZ07 40
Figura 20 – Leituras do Instrumento INA05 40
Figura 21 – Leituras do Instrumento INA06 41
Figura 22 – Leituras inconsistentes do PZ03 42
Figura 23 – Leituras inconsistentes do PZ04 42
Figura 24 – Leituras inconsistentes do PZ06 43
Figura 25 – Gráfico da análise descritiva do PZ03 44
Figura 26 – Gráfico da análise descritiva do PZ04 44
Figura 27 – Gráfico da análise descritiva do PZ05 45
Figura 28 – Gráfico da análise descritiva do PZ06 45
Figura 29 – Gráfico da análise descritiva do PZ07 45
Figura 30 – Gráfico da análise descritiva do INA05 46
Figura 31 – Gráfico da análise descritiva do INA06 46
Figura 32 – Níveis de controle do instrumento PZ03 56
Figura 33 – Níveis de controle do instrumento PZ04 56
Figura 34 – Níveis de controle do instrumento PZ05 56
Figura 35 – Níveis de controle do instrumento PZ06 57
Figura 36 – Níveis de controle do instrumento PZ07 57
Figura 37 – Níveis de controle do instrumento INA05 57
Figura 38 – Níveis de controle do instrumento INA06 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados Cadastrais dos Piezômetros da Barragem em Estudo.....30
Tabela 2 – Dados Cadastrais dos Indicadores de Nível D'água da Barragem Piloto. 30
Tabela 3 – Valores estatísticos dos instrumentos 44
Tabela 4 – Relação dos valores de "n" de cada nível para os três resultados promissores 49
Tabela 5 – Níveis de controle de INA's e PZ's referentes ao Resultado 1 50
Tabela 6 – Níveis de controle de INA's e PZ's referentes ao Resultado 2 51
Tabela 7 – Níveis de controle de INA's e PZ's referentes ao Resultado 3 52
Tabela 8 – Comparação entre os valores propostos pelo Resultado 1 e as leituras máximas dos instrumentos 53
Tabela 9 – Comparação entre os valores propostos pelo Resultado 3 e as leituras máximas dos instrumentos 54
Tabela 10 – Comparação entre os valores propostos pelo Resultado 2 e as leituras máximas dos instrumentos 55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9

1.1 Objetivo Geral 11
1.2 Objetivos Específicos 11

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12

2.1 Barragem de terra-enrocamento 12
2.2 Instrumentação de barragem 14
2.3 Legislação de segurança de barragens 21
2.4 Indicativos de ruptura de barragens: um breve panorama da Barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão 23
2.5 Zona de Consistência e Inconsistência na Definição dos Níveis de Controle: A Perspectiva de Penna et al. (2017), Fusaro (2007) e Bretas (2019) 25

3 MATERIAIS E MÉTODOS 29

3.1 Barragem em Estudo 29
3.2 Instrumentos 30
3.3 Metodologia 33

3.3.1 Banco de Dados 34
3.3.2 Gráficos de leituras x tempo x pluviometria 34
3.3.3 Detecção de leituras inconsistentes 35
3.3.4 Análise descritiva 35
3.3.5 Formulação para definição dos níveis de controle 35

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 36

4.1 Gráficos Leituras x Tempo x Pluviometria 36
4.2 Detecção de Leituras Inconsistentes 41
4.3 Análise descritiva 43
4.4 Formulação para definição dos níveis de controle e resultados 47
4.5 Definição dos níveis de controle 53

5 CONCLUSÃO 59

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 61

1 INTRODUÇÃO

As barragens, estruturas destinadas a conter e armazenar grandes volumes de água ou resíduos, têm desempenhado um papel relevante ao longo da história da engenharia, sendo utilizadas para diversos fins, como abastecimento de água, irrigação, controle de inundações, geração de energia hidrelétrica e disposição de rejeitos na mineração. Em linhas gerais, a construção de barragens remonta às civilizações antigas, com exemplos notáveis como as barragens romanas e egípcias, que refletem a engenhosidade humana em manipular o ambiente para garantir a segurança e o bem-estar social. Com o avanço tecnológico e a expansão das atividades econômicas, a construção de barragens tornou-se uma prática difundida em todo o mundo, destacando-se a necessidade de monitoramento constante para assegurar a sua integridade estrutural e a segurança das comunidades a jusante.

A instrumentação de barragens, portanto, apresenta grande importância na avaliação contínua das condições de segurança dessas estruturas. Através de instrumentos de monitoramento, como piezômetros (PZ) e indicadores de nível d'água (INA), é possível detectar variações nos parâmetros operacionais que possam indicar o início de processos de deterioração, deslocamentos ou infiltrações anômalas. Assim, o monitoramento sistemático permite a antecipação de cenários de susceptibilidade à falhas e a definição de medidas preventivas ou corretivas, assegurando a estabilidade e o desempenho das barragens ao longo de sua vida útil. De fato, a instrumentação proporciona dados essenciais para a compreensão do comportamento estrutural sob diversas condições, como é uma exigência normativa fundamental para o cumprimento das legislações vigentes (Marinaro, 2022).

Neste sentido, a legislação sobre segurança de barragens, especialmente após eventos catastróficos, como as rupturas ocorridas em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), tem se tornado cada vez mais rigorosa. No Brasil, o arcabouço legal estabelecido pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e regulamentado pela Agência Nacional de Mineração (ANM) busca assegurar a estabilidade dessas estruturas através de normas detalhadas e específicas. A Resolução ANM N.º 95, de 7 de fevereiro de 2022, posteriormente atualizada pela Resolução ANM n° 130/2023, consolida os atos normativos relativos à segurança de barragens de mineração, e estabelece, entre outros requisitos, a obrigatoriedade de

incluir no Volume III - Registros e Controle do Plano de Segurança de Barragens (PSB) a definição dos níveis de controle para a instrumentação de barragens.

Conforme disposto na referida Resolução, os níveis de controle são definidos como os limites aceitáveis de parâmetros monitorados, específicos para cada instrumento da estrutura, que visam subsidiar a tomada de decisões para ações preventivas e corretivas. Esses níveis são classificados em normal, alerta e emergência, e devem ser determinados individualmente para cada barragem por meio de avaliações técnicas de segurança. No entanto, como destacado por Marinaro (2022), embora a definição desses níveis de controle seja mandatória, a Resolução não especifica a metodologia a ser empregada para tal fim, deixando margem para a aplicação de diferentes abordagens técnicas.

Neste contexto, o presente estudo propõe uma metodologia para a definição dos níveis de controle de uma barragem piloto, com base no comportamento histórico da instrumentação existente. A abordagem metodológica desenvolvida neste trabalho associa a análise histórica dos dados obtidos por piezômetros e indicadores de nível d'água à avaliação estatística dos registros coletados. Essa metodologia visa definir níveis de controle específicos por meio da interpretação estatística dos dados, agrupando os instrumentos em categorias e identificando padrões de comportamento.

Além disso, foi realizada uma análise crítica do desempenho estrutural e do comportamento da instrumentação, incluindo a avaliação do histórico de anomalias, variação do nível freático, operação do sistema de drenagem interna, e verificação dos fatores que influenciam a resposta de cada instrumento.

Assim, os níveis de controle para esses instrumentos foram estabelecidos com base na análise estatística dos dados coletados entre junho de 2020 e junho de 2024, totalizando um período de quatro anos. Essa análise considerou os valores de referência e os desvios padrão das amostras de dados, bem como a definição de um fator multiplicador do desvio padrão ajustado para cada faixa de operação específica dos instrumentos de monitoramento. Desta forma, este estudo contribui para o aprimoramento da segurança de barragens, fornecendo uma abordagem prática e estatisticamente robusta para a definição dos níveis de controle da instrumentação geotécnica.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na determinação de uma metodologia para definição de níveis de referência para detecção de comportamento anômalo de piezômetros e indicadores de nível d'água, a partir da análise histórica da instrumentação de uma barragem localizada na região do quadrilátero ferrífero.

1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- apresentar a importância de banco de dados geotécnicos confiáveis para a instrumentação de barragens;
- Apresentar a importância da análise crítica de instrumentação de barragens para a segurança destas estruturas;
- apresentar as etapas para a definição dos níveis de controle por meio de análises estatísticas;
- apresentar os níveis de controle para a Barragem em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Barragem de terra-enrocamento

As barragens de terra-enrocamento constituem estruturas hidráulicas complexas que combinam materiais heterogêneos para garantir a contenção de água, sedimentos ou rejeitos, sendo amplamente empregadas em diferentes contextos geotécnicos e ambientais. A escolha desse tipo de barragem é, em grande medida, influenciada pelos condicionantes geológico-geotécnicos do local de construção, pela disponibilidade e qualidade dos materiais locais, bem como pela finalidade específica da obra. Cada um desses aspectos desempenha um papel fundamental na definição das características estruturais e no desempenho a longo prazo da barragem, requerendo uma análise meticulosa e criteriosa para assegurar a segurança e a eficiência da obra.

Incialmente, as características geotécnicas do local de construção são determinantes para o projeto e execução de uma barragem de terra-enrocamento. Essas características incluem a natureza do solo de fundação, a presença de camadas de materiais permeáveis ou impermeáveis, o nível do lençol freático, as propriedades de compactação e a capacidade de suporte do terreno. A fundação deve apresentar uma capacidade adequada para suportar as cargas impostas pela barragem e pelo reservatório, sendo essencial evitar solos moles ou altamente compressíveis, que possam causar recalques excessivos ou deslizamentos. Para Mello (1975), em locais onde o solo de fundação é menos resistente, pode ser necessário realizar melhoramentos do solo, como a instalação de colunas de brita ou a injeção de cimento, para garantir a estabilidade da barragem (Mello, 1975). Além disso, Massad (2010) complementa que a presença de rochas fraturadas ou fissuradas nas fundações pode implicar na necessidade de cortinas de injeção ou de selagens adicionais para minimizar as percolações de água, que poderiam comprometer a estabilidade da estrutura (Massad, 2010).

O tipo de material disponível nas proximidades da obra também é um fator importante na decisão de adotar uma barragem de terra-enrocamento. Em geral, a construção desse tipo de barragem requer o uso de materiais locais, como solos coesivos para o núcleo impermeável e rochas ou cascalhos para o enrocamento. O núcleo da barragem é tipicamente composto por argilas ou siltes de baixa

permeabilidade, que são compactados em camadas finas para reduzir a percolação de água. Já o enrocamento, responsável pela estabilidade do maciço, é formado por blocos de rochas de diferentes granulometrias, dispostos de maneira a proporcionar um alto grau de intertravamento e resistência ao cisalhamento (Mariano; Silva, 2022). A seleção e o tratamento dos materiais utilizados devem seguir rigorosos critérios de engenharia, como o “Critério de Filtro de Terzaghi”, para garantir que o enrocamento ofereça suporte estrutural, facilite a drenagem adequada e previna o fenômeno de erosão interna regressiva que pode comprometer a integridade da barragem (Terzaghi, 1943).

A finalidade da obra, por sua vez, também influencia diretamente o dimensionamento e as especificações técnicas da barragem de terra-enrocamento. Estas barragens podem ser projetadas para diferentes usos, como a contenção de rejeitos de mineração, a geração de energia hidrelétrica, a regulação de fluxos hídricos, o abastecimento de água e a irrigação. Nesta direção, cada finalidade impõe diferentes demandas de desempenho à barragem. Por exemplo, barragens destinadas à contenção de rejeitos requerem uma capacidade de retenção mais elevada e sistemas de drenagem que minimizem o risco de liquefação do material armazenado, ao passo que barragens para geração de energia hidrelétrica precisam ser projetadas para suportar cargas hidráulicas flutuantes e variações significativas no nível do reservatório (Machado, 2007). Em todos os casos, o projeto deve considerar os cenários de operação mais críticos, como eventos extremos de cheia ou de esvaziamento rápido, para assegurar que a barragem mantenha sua integridade sob quaisquer condições (ICOLD, 1973).

A disponibilidade de materiais também impõe limitações ao projeto. Em locais onde há uma abundância de rochas de boa qualidade, as barragens de enrocamento com membranas de concreto podem ser uma escolha apropriada, pois permitem uma construção mais rápida e menos dependente das condições climáticas, ao mesmo tempo em que proporcionam elevada resistência estrutural e durabilidade (Mariano; Silva, 2022). Por outro lado, em regiões onde o solo de empréstimo é predominantemente argiloso, pode ser mais econômico optar por uma barragem de terra com filtros apropriados para controlar a percolação e proteger contra o *piping.*

Conforme Jansen (1983), o fator hidrológico também exerce uma influência decisiva na concepção da barragem. Em regiões sujeitas a chuvas intensas ou a grandes variações sazonais no fluxo dos rios, a barragem deve ser projetada para

lidar com essas condições extremas, incluindo a incorporação de vertedouros adequados e sistemas de dissipação de energia para proteger os taludes contra a erosão (ICOLD, 1973).

No contexto geológico, a capacidade de suporte das fundações, a estabilidade dos taludes e a presença de fraturas ou outras descontinuidades geológicas devem ser cuidadosamente analisadas para garantir que a barragem possa resistir às forças dinâmicas geradas por terremotos, flutuações de carga e outras ações externas (Jansen, 1983).

Além disso, as restrições de prazo e custo são fatores que frequentemente determinam a escolha do tipo de barragem a ser construído, como reiterado por Massad (2010). Barragens de concreto são geralmente mais caras e exigem mais tempo de construção, mas podem ser preferíveis em locais onde a durabilidade e a resistência a eventos catastróficos são prioridades. Por outro lado, barragens de terra-enrocamento oferecem uma solução mais flexível e econômica, particularmente em locais onde há disponibilidade de materiais locais e as condições geotécnicas permitem sua utilização sem grandes intervenções (Massad, 2010).

Finalmente, a experiência e o julgamento do projetista desempenham um papel importante na definição do tipo de barragem e das técnicas de construção a serem utilizadas. Para tanto, a escolha do tipo de barragem deve ser fundamentada em uma avaliação objetiva e científica dos fatores envolvidos, mas a experiência prática e o conhecimento empírico adquiridos ao longo de anos de prática profissional também são essenciais para antecipar possíveis problemas e propor soluções eficazes e inovadoras (Mello, 1975).

2.2 Instrumentação de barragem

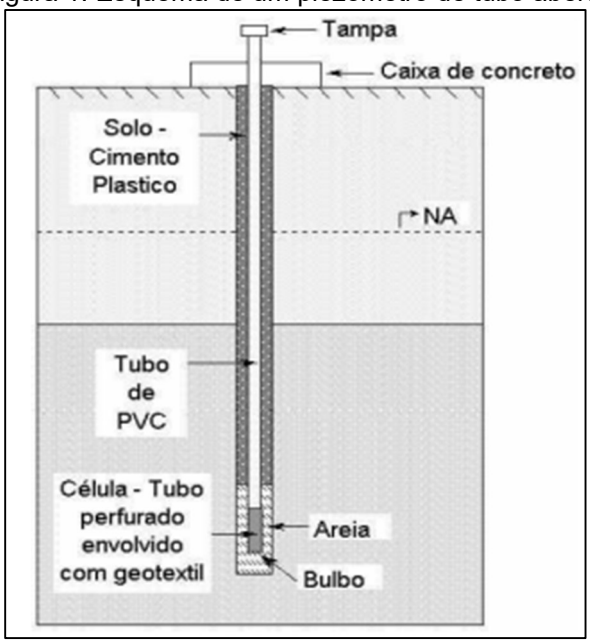
Uma barragem de terra-enrocamento pode ser monitorada por meio de um sistema de auscultação geotécnica, definido como um conjunto de processos destinados à observação, detecção e caracterização de possíveis deteriorações que possam representar um risco potencial à segurança estrutural e operacional da barragem (Fonseca, 2003). A instrumentação de barragens exerce um papel central nesse monitoramento, permitindo a coleta contínua de dados relacionados às condições da estrutura, tanto por meio de inspeções visuais, realizadas periodicamente, quanto através de instrumentos instalados na fundação e no corpo

da barragem. Essa abordagem integrada proporciona uma compreensão abrangente das condições operacionais da barragem e possibilita intervenções preventivas antes que ocorram falhas críticas.

Para isso, o uso de piezômetros (PZ) e indicadores de nível d'água (INA) é essencial na instrumentação de barragens de terra-enrocamento. Segundo Marinho (2010), os piezômetros são dispositivos utilizados para medir a pressão da água nos poros do solo, fornecendo informações sobre o fluxo de água através da estrutura e a sua fundação. Eles podem ser classificados em diferentes tipos, como piezômetros de tubo aberto, de corda vibrante, pneumáticos e elétricos, cada um com características específicas que influenciam na precisão e na aplicabilidade em diferentes condições geotécnicas.

De modo abrangente, os piezômetros de tubo aberto, também conhecidos como piezômetros Casagrande, são dispositivos simples e econômicos, amplamente empregados na medição da poropressão em solos menos permeáveis, como argilas ou siltes. Esses piezômetros consistem basicamente em um tubo de plástico ou metal, perfurado em sua parte inferior, que é inserido no solo até a profundidade desejada. A porção perfurada do tubo permite que a água do solo entre no piezômetro, e o nível da água dentro do tubo reflete a poropressão naquele ponto específico. A simplicidade desse instrumento facilita sua instalação e operação, tornando-o uma escolha popular em projetos onde a precisão extrema não é uma exigência crítica. Entretanto, uma limitação dos piezômetros de tubo aberto é a sua resposta lenta a mudanças repentinas na poropressão, o que os torna menos adequados para solos de alta permeabilidade ou onde há grandes variações de carga hidráulica (Marinho, 2010; Santos, 2022). Na Figura 1 é apresentado um esquema de piezômetro de tubo aberto.

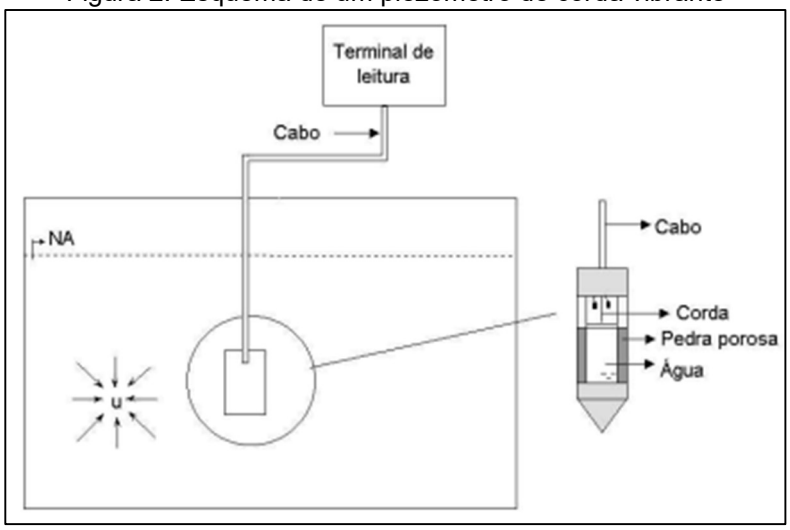
Figura 1: Esquema de um piezômetro de tubo aberto



Fonte: Fonseca (2003)

Os piezômetros de corda vibrante, por outro lado, são dispositivos mais sofisticados, projetados para oferecer maior precisão e sensibilidade na medição das poropressões, especialmente em solos onde essas variações podem ter consequências significativas para a estabilidade da estrutura. Esses piezômetros operam com base no princípio da corda vibrante, onde uma corda metálica dentro do sensor é tensionada em resposta à pressão exercida pela água no solo. A frequência de vibração da corda, que é diretamente proporcional à tensão aplicada, é medida eletronicamente e convertida em valores de pressão. Este tipo de piezômetro é altamente sensível e capaz de detectar pequenas mudanças na poropressão, o que é crucial em solos de alta permeabilidade, como areias, ou em situações onde a precisão é essencial, como em fundações críticas de barragens de terra-enrocamento. Além disso, os piezômetros de corda vibrante são duráveis e podem ser utilizados em ambientes agressivos, mas seu custo e complexidade de instalação são consideravelmente mais elevados em comparação aos piezômetros de tubo aberto (Marinho, 2010; Santos, 2022). Na Figura 2 é apresentado um esquema de um piezômetro de corda vibrante.

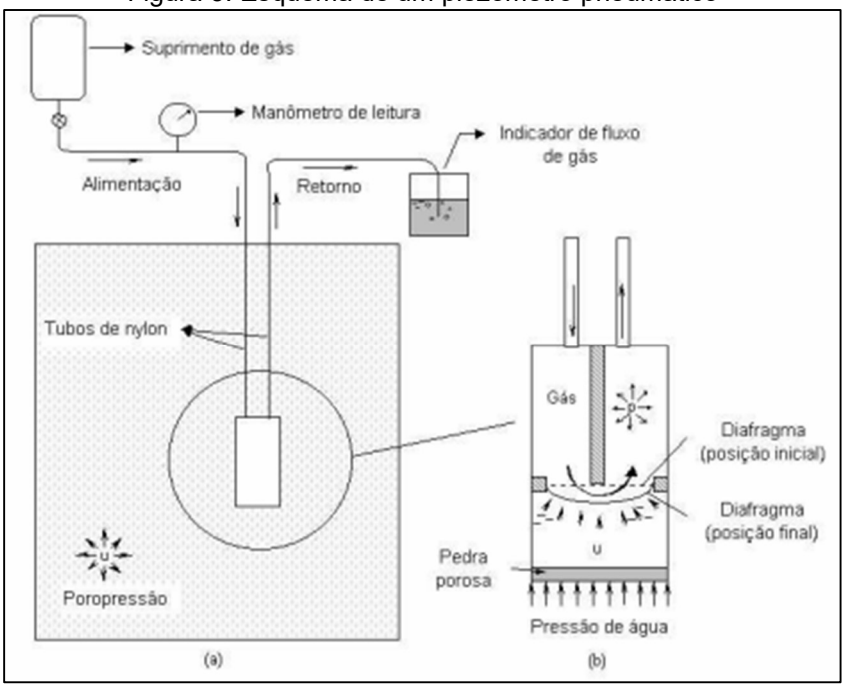
Figura 2: Esquema de um piezômetro de corda vibrante



Fonte: Fonseca (2003)

Paralelamente, os piezômetros pneumáticos representam outra variante, onde a medição da poropressão é realizada através do uso de gás comprimido. Neste sistema, um tubo conduz gás até o ponto de medição, e a pressão é medida indiretamente, observando-se a resistência à passagem do gás, que é influenciada pela pressão da água no solo. A principal vantagem dos piezômetros pneumáticos é a sua rapidez de resposta, o que os torna ideais para situações em que são necessárias medições frequentes e rápidas, como durante testes de carregamento ou eventos de cheia súbita. Além disso, esses piezômetros são menos suscetíveis a problemas de entupimento, uma vantagem significativa em solos com altas concentrações de partículas finas. No entanto, a necessidade de equipamentos adicionais para o fornecimento e controle do gás, bem como a manutenção mais complexa, pode ser uma desvantagem em relação a outros tipos (Marinho, 2010). Na Figura 3 é apresentado um esquema de um piezômetro pneumático.

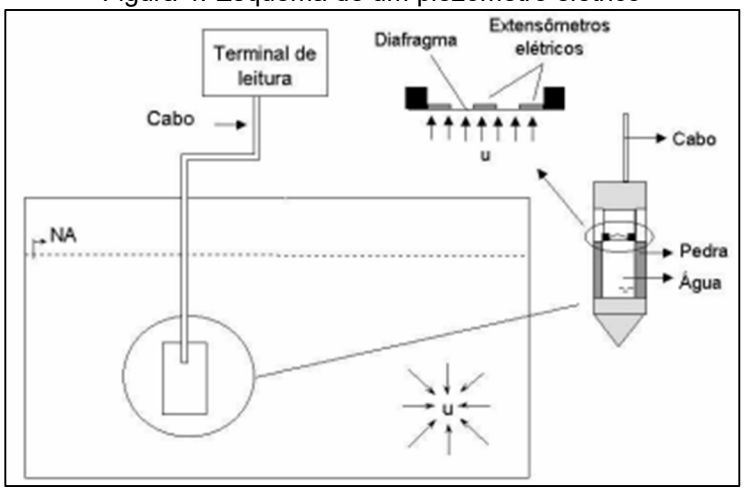
Figura 3: Esquema de um piezômetro pneumático



Fonte: Fonseca (2003)

Por fim, os piezômetros elétricos são instrumentos que utilizam transdutores elétricos para converter a poropressão em um sinal elétrico, que pode ser facilmente registrado e analisado. Estes dispositivos são altamente precisos e podem ser integrados a sistemas de monitoramento automatizados, permitindo a coleta de dados em tempo real. Conforme Santos (2022), a capacidade de fornecer medições contínuas e precisas faz dos piezômetros elétricos uma escolha excelente para monitoramento em longo prazo, especialmente em barragens de grande porte onde a segurança é uma preocupação primordial. No entanto, sua complexidade e o custo elevado podem limitar seu uso em projetos onde o orçamento é uma restrição significativa. Ressalta-se ainda que a necessidade de fontes de alimentação confiáveis e a suscetibilidade a interferências eletromagnéticas são aspectos que devem ser considerados na escolha deste tipo de piezômetro (Santos, 2022).

Figura 4: Esquema de um piezômetro elétrico

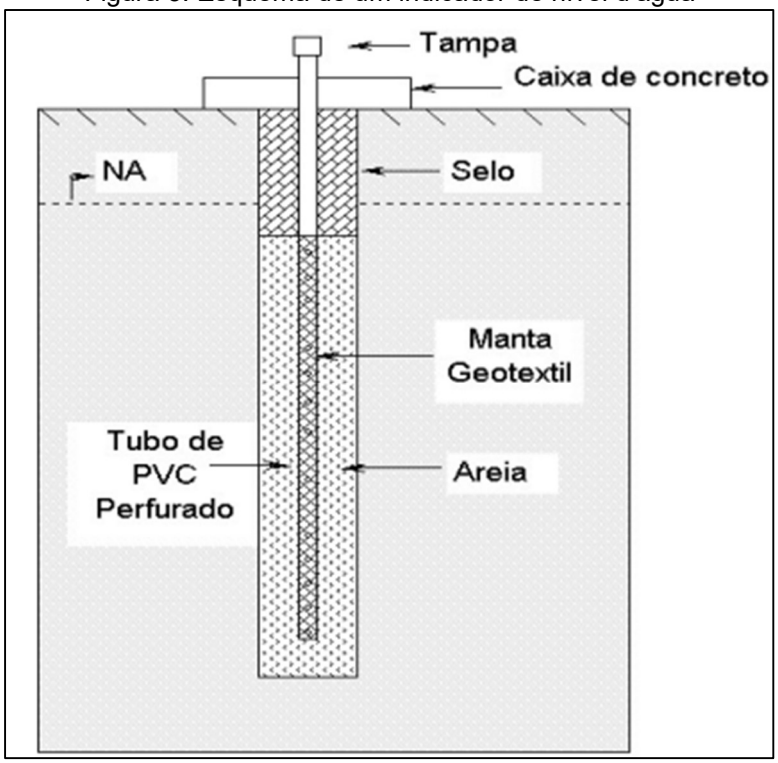


Fonte: Fonseca (2003)

Massad (2010) enfatiza que os piezômetros são fundamentais para a avaliação da estabilidade dos taludes de barragens de terra-enrocamento, uma vez que permitem a detecção de variações anômalas no nível do lençol freático, que podem indicar o desenvolvimento de potenciais zonas de ruptura. Por isso que, nesse campo, a utilização de piezômetros pneumáticos e elétricos é recomendada devido à alta precisão na leitura das poropressões, como em fundações complexas ou em barragens sujeitas a fortes flutuações de carga hidráulica.

No que concerne aos indicadores de nível d'água, tratam-se de dispositivos projetados para monitorar o nível de água em reservatórios e nas áreas adjacentes à barragem. Eles fornecem dados para o controle de operações, como a manutenção de níveis seguros de armazenamento e a gestão de fluxos de descarga (Melo, 2012). Os INAs podem ser compostos por diversos tipos de sensores, incluindo sensores de pressão, flutuadores, sensores ultrassônicos e dispositivos ópticos, cada um adequado para diferentes contextos operacionais e exigências de precisão (Melo, 2012; Fonseca, 2003). Na Figura 5 é apresentado um esquema de um medidor de nível d'água.

Figura 5: Esquema de um indicador de nível d'água



Fonte: Fonseca (2003)

Para Santos (2022), o monitoramento contínuo e preciso dos níveis de água e das pressões intersticiais é essencial para a definição de níveis de controle, que são limites preestabelecidos de operação seguros para os instrumentos de monitoramento. A definição desses níveis é fundamental para identificar quando uma barragem está operando fora das condições normais e, consequentemente, quando requerem uma intervenção para evitar danos estruturais ou colapso (Santos, 2022). Neste contexto, a Resolução ANM nº 95/2022 e sua atualização pela Resolução nº 130/2023 estabelecem que as barragens de mineração no Brasil devem possuir níveis de controle bem definidos para cada instrumento de monitoramento, incluindo piezômetros e indicadores de nível d'água (ANM, 2022; 2023).

No entanto, conforme discutido por Santos (2022), uma das limitações da norma é a falta de uma metodologia clara para a definição desses níveis de controle, o que pode levar a interpretações subjetivas e potencialmente equivocadas por parte dos responsáveis técnicos. De fato, Marinaro (2022) argumenta que, embora a norma estabeleça a necessidade de monitoramento regular e a definição de níveis de controle, ela não fornece orientações específicas sobre como esses níveis devem ser calculados, especialmente em condições geotécnicas complexas ou em barragens que já apresentem algum nível de deterioração. Essa falta de especificidade pode

resultar em uma resposta tardia a situações de risco, como evidenciado nos casos de ruptura de barragens no Brasil, incluindo as tragédias de Mariana e Brumadinho.

Assim, a instrumentação geotécnica de barragens de terra-enrocamento, envolvendo o uso de piezômetros e indicadores de nível d'água, constitui uma ferramenta fundamental para a manutenção da segurança e da integridade estrutural dessas infraestruturas. Como afirmam Massad (2010) e Marinho (2010), a seleção e a correta calibração dos instrumentos, juntamente com uma metodologia para a definição de níveis de controle, são essenciais para assegurar que a barragem opere dentro de parâmetros seguros e para a prevenção de desastres.

2.3 Legislação de segurança de barragens

A legislação de segurança de barragens no Brasil tem evoluído significativamente nas últimas décadas, em resposta a eventos críticos e à necessidade de regulamentar práticas de segurança em um país com vasta infraestrutura de barragens. A base do arcabouço legal é a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (Brasil, 2010). Esta lei regula a construção, operação, manutenção e desativação de barragens, estabelecendo responsabilidades para empreendedores e órgãos de fiscalização (Brasil, 2010). A PNSB define os princípios fundamentais da segurança, como a obrigatoriedade de um Plano de Segurança de Barragem (PSB) e de um Plano de Ação de Emergência (PAE) para barragens de alto potencial de dano, além da classificação das barragens de acordo com seu risco e potencial de danos em caso de rompimento, considerando perdas humanas, econômicas e ambientais.

A legislação foi complementada por resoluções como a nº 236 da Agência Nacional de Águas (ANA), de 2017, que introduziu diretrizes para o monitoramento e fiscalização de barragens de acumulação de água, consolidando práticas de auditorias regulares e inspeções obrigatórias para gestão preventiva de riscos (ANA, 2017). Adicionalmente, a Resolução nº 13 da Agência Nacional de Mineração (ANM), de 2019, revisou a PNSB após o rompimento da barragem de Brumadinho, estabelecendo diretrizes mais rígidas para o monitoramento e inspeção de barragens de rejeitos, como a obrigatoriedade de sistemas automatizados de monitoramento e a implementação de tecnologias avançadas para detecção de anomalias. Essa

resolução também exige redundância nos sistemas de alerta e revisões periódicas dos planos de emergência (ANM, 2019).

A Resolução ANM nº 95, de 2022, reforçou a necessidade de um sistema integrado de gestão de segurança, com níveis de controle para instrumentos de monitoramento geotécnico, como piezômetros e indicadores de nível d'água, classificados em normal, alerta e emergência, cada qual determinando respostas específicas para ações corretivas ou preventivas (ANM, 2022). No entanto, a falta de uma metodologia clara para definir esses níveis de controle é uma limitação reconhecida, que pode comprometer a eficácia da gestão de segurança (Marinaro, 2022). Posteriormente, a Resolução ANM nº 130/2023 consolidou essas diretrizes, introduzindo critérios mais rígidos para auditorias de segurança, realizadas por consultores independentes, sem vínculos financeiros com os empreendedores, para garantir transparência e credibilidade dos relatórios (ANM, 2023).

Já a Lei nº 14.066, de 2020, trouxe modificações importantes à PNSB, aumentando penalidades para infrações e introduzindo o "Plano de Encerramento e Desativação de Barragens", que deve incluir medidas para estabilização final e recuperação ambiental antes do fim da vida útil da estrutura. Essa legislação também impõe multas elevadas e pode resultar na suspensão imediata das atividades, conforme a gravidade da infração (Brasil, 2020). A Resolução nº 13 da ANM exige ainda que barragens de mineração sejam geridas por engenheiros geotécnicos qualificados, e que os profissionais responsáveis pela segurança recebam treinamentos específicos periódicos sobre monitoramento, detecção de anomalias e resposta a emergências, em conformidade com os padrões da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) (ANM, 2019).

A legislação enfatiza também a transparência e o acesso à informação, determinando que os dados de monitoramento, auditorias e relatórios de inspeção sejam acessíveis ao público, conforme a Resolução nº 236 da ANA (2017) e a Lei nº 12.334/2010, fortalecendo a confiança pública nas medidas de segurança adotadas (Brasil, 2010; ANA, 2017). O Brasil segue, ainda, as recomendações da ICOLD, incorporando boas práticas de engenharia e normas internacionais de segurança, adotando critérios rigorosos para a classificação de barragens, avaliação contínua de riscos e auditorias independentes, para garantir a conformidade com padrões globais e mitigar os riscos de falhas catastróficas (ICOLD, 2018).

Assim, verifica-se que a legislação de segurança de barragens no Brasil representa um esforço contínuo de adaptação e aprimoramento para enfrentar os desafios de uma infraestrutura em expansão, visando proteger a população e o meio ambiente. A evolução normativa busca assegurar operações seguras e eficientes, através de monitoramento contínuo, transparência, responsabilidade técnica e alinhamento com padrões internacionais, ainda que persistam desafios na implementação de metodologias claras e na mitigação de conflitos de interesse nas auditorias de segurança.

2.4 Indicativos de ruptura de barragens: um breve panorama da Barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão

A ruptura da Barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, operada pela Vale S.A., ocorreu em 25 de janeiro de 2019, no município de Brumadinho, Minas Gerais, e resultou em uma das mais graves catástrofes ambientais e humanas da história do Brasil. A barragem, utilizada para a contenção de rejeitos de minério de ferro, foi construída pelo método de alteamento a montante, um dos métodos mais econômicos, mas também mais arriscados para a estabilidade da estrutura. Localizada na bacia hidrográfica do ribeirão Ferro-Carvão, a barragem tinha capacidade para armazenar cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos, que se dispersaram violentamente após o rompimento, causando 270 mortes e extensos danos ambientais ao longo do rio Paraopeba, afetando também a qualidade da água e os ecossistemas locais (Oliveira et al., 2021).

Os fatores que contribuíram para o colapso da barragem foram detectados progressivamente por diversos instrumentos de monitoramento. Antes do rompimento, os piezômetros instalados na estrutura, responsáveis pela medição da poropressão, registraram aumento progressivo das pressões internas, indicando a saturação dos materiais. Essa elevação das poropressões é um indicativo típico de instabilidade, especialmente em barragens construídas pelo método de alteamento a montante, onde o aumento da saturação pode resultar em liquefação, um fenômeno em que o solo perde sua resistência e se comporta como um líquido (Oliveira et al., 2021). Nos meses que antecederam o desastre, houve registros de leituras anômalas nos piezômetros, com poropressões acima dos níveis considerados seguros, porém, tais alertas não resultaram em ações corretivas eficazes por parte da Vale S.A.

Além dos piezômetros, outros instrumentos também apontaram sinais de risco iminente. Inclinômetros, utilizados para medir a inclinação e deformação da barragem, detectaram movimentos progressivos que sugeriam um deslizamento gradual da estrutura. Esses movimentos eram compatíveis com uma falha progressiva do maciço de rejeitos, que, combinados com o aumento da poropressão, indicavam uma instabilidade iminente (Almeida et al., 2021). Inspeções visuais realizadas na barragem também identificaram fissuras e movimentações localizadas na crista, sinais adicionais de que a barragem estava sob estresse estrutural significativo.

O comportamento da barragem antes do rompimento seguiu um padrão de instabilização lenta, com uma série de eventos precursores que culminaram na falha catastrófica. No dia do rompimento, não houve alerta sonoro acionado, apesar dos dados coletados pelos instrumentos de monitoramento sugerirem uma situação de risco elevado. A liquefação súbita do material de rejeito, principalmente na parte central e na crista da barragem, desencadeou um deslizamento massivo, caracterizado pelo colapso rápido da estrutura. A massa de rejeitos, saturada de água e desprovida de coesão, deslizou pela encosta e varreu tudo em seu caminho, destruindo instalações industriais, residências e causando um impacto devastador ao longo de todo o vale do ribeirão Ferro-Carvão até atingir o rio Paraopeba (Almeida et al., 2021; Oliveira et al., 2021).

Investigações conduzidas após o rompimento, incluindo aquelas da Agência Nacional de Mineração (ANM), revelaram várias falhas na gestão de segurança da barragem. Entre os problemas identificados, destacam-se a insuficiência e a inadequação dos sistemas de monitoramento e alerta. Os piezômetros e outros instrumentos indicavam elevações nas poropressões e movimentações na estrutura que sugeriam risco iminente, mas essas informações não desencadearam respostas adequadas. A falta de uma definição clara dos níveis de controle e de uma metodologia robusta para interpretar os dados de monitoramento também foi citada como uma falha crítica no gerenciamento da barragem (Almeida et al., 2021).

A análise pós-desastre indicou que o rompimento foi resultado de um processo de liquefação dos rejeitos associado a uma gestão inadequada dos riscos e à falta de resposta eficaz aos sinais de alerta. A saturação excessiva do solo, a alta porosidade dos materiais utilizados no alteamento e as deficiências nas inspeções de segurança agravaram o risco, culminando na perda total de resistência do maciço da barragem e seu consequente colapso. O sistema de alerta da barragem, que deveria ter sido

acionado para alertar as comunidades a jusante, não funcionou a tempo, agravando ainda mais as consequências humanas do desastre (Oliveira et al., 2021).

Diante das evidências, o rompimento da barragem do Córrego do Feijão ilustra a necessidade de uma revisão profunda nas práticas de monitoramento e gestão de segurança de barragens no Brasil, especialmente aquelas construídas pelo método de alteamento a montante, reconhecidamente vulnerável. O evento reforçou a importância de implementar sistemas de monitoramento mais rigorosos e de garantir que as leituras de instrumentos como piezômetros e inclinômetros sejam interpretadas com rigor técnico e levadas em consideração para ações corretivas imediatas (Oliveira et al., 2021; Almeida et al., 2021). Além disso, destaca a necessidade de maior transparência na comunicação dos riscos às comunidades potencialmente afetadas e de uma fiscalização mais rigorosa por parte das autoridades competentes.

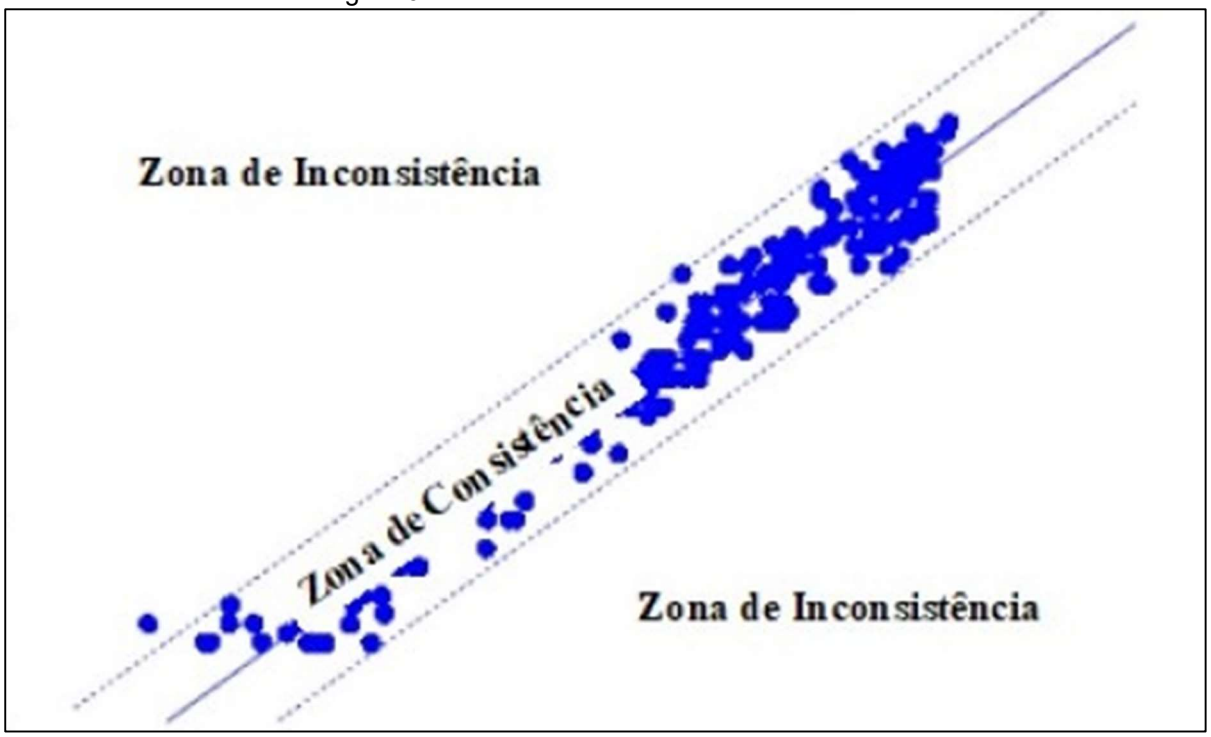
Desta forma, o desastre de Brumadinho revelou fragilidades nas práticas de segurança da mineração e também a urgência de repensar o papel das políticas públicas, das regulamentações e da responsabilização das empresas pelo cumprimento de padrões de segurança mais robustos, a fim de prevenir futuros eventos catastróficos e proteger as vidas humanas e o meio ambiente (Oliveira et al., 2021).

2.5 Zona de Consistência e Inconsistência na Definição dos Níveis de Controle: A Perspectiva de Penna et al. (2017), Fusaro (2007) e Bretas (2019)

Na definição de níveis de controle para o monitoramento de barragens, especialmente em estruturas de terra e terra-enrocamento, a delimitação das "zonas de consistência" e "inconsistência", bem como o tratamento estatístico de *outliers*, são fundamentais para compreender comportamentos anômalos e, consequentemente, para garantir a segurança estrutural. Ao longo dos anos, diferentes abordagens foram propostas para tratar essas questões, com destaque para as perspectivas apresentadas por Penna et al. (2017), Fusaro (2007) e Bretas (2019), que convergem para a necessidade do uso de métodos estatísticos para análise dos dados de monitoramento.

O conceito de "zona de consistência", conforme discutido por Penna et al. (2017), refere-se ao intervalo de valores de um determinado parâmetro de monitoramento em que os dados são considerados normais e esperados, refletindo o comportamento regular da estrutura sob condições operacionais seguras. Essa definição é baseada na análise estatística de dados históricos, em que se utiliza um intervalo de confiança de 95%, dada uma função densidade de probabilidade de um dado, para incluir os valores mais frequentes, excluindo medições anômalas ou discrepantes. Segundo Fusaro (2007), essa delimitação é crucial para garantir que a maioria dos dados observados esteja dentro dos limites aceitáveis de variação, evitando que flutuações naturais sejam erroneamente interpretadas como sinais de alerta ou anomalias.

Figura 6: Zona de inconsistência e consistência



Fonte: adaptado de Fusaro (2007)

Em contraponto a esse conceito, a "zona de inconsistência" abrange os valores que estão fora desse intervalo de confiança de 95%. Fusaro (2007) destaca que essa zona é composta por dados que se afastam significativamente da média esperada, potencialmente indicando condições de risco ou falhas operacionais. A identificação dessas inconsistências permite que os engenheiros e técnicos responsáveis possam rapidamente identificar e investigar possíveis problemas na estrutura da barragem, evitando riscos maiores. Ambos os autores concordam que, para garantir a precisão da definição dessas zonas, é necessário um tratamento estatístico adequado, que

considere a variabilidade intrínseca dos dados coletados e o comportamento esperado da estrutura ao longo do tempo.

Thiago Bretas (2019) também destaca a importância da aplicação de estatísticas descritivas básicas, como a média, o desvio padrão e percentis específicos, para a definição de níveis de controle em dados de monitoramento de barragens. A média aritmética (μ) é calculada como o somatório de todos os valores observados dividido pelo número total de observações, representando o valor central ou típico de um conjunto de dados. A fórmula para a média aritmética é dada pela equação (1).

$$\mu = \frac{\sum x_i}{n}$$

onde x_i representa o iésimo valor observado e n é o número total de observações. A média fornece uma estimativa do comportamento esperado do sistema sob condições normais, sendo um ponto de partida para a análise estatística dos dados.

O desvio padrão amostral (Sx), por sua vez, quantifica a dispersão dos valores em torno da média, indicando o grau de variabilidade ou incerteza associado aos dados. É calculado pela raiz quadrada da variância, que é a média dos quadrados das diferenças entre cada valor observado e a média. A fórmula para o desvio padrão amostral é:

$$\mathrm{Sx} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

onde x_i é o iésimo valor observado, $\bar{x}$ é o valor médio das observações, e n é o número total de observações. Um desvio padrão alto indica uma maior variabilidade nos dados, enquanto um desvio padrão baixo sugere que os valores estão mais concentrados em torno da média.

A abordagem proposta por Bretas (2019) utiliza essas medidas para definir intervalos de controle que considerem 95% das leituras mais frequentes, excluindo os 5% de leituras superiores que são mais extremas e podem representar situações anômalas ou erros de medição. Em outras palavras, essa metodologia se baseia na

suposição de que os dados seguem uma distribuição normal, na qual aproximadamente 95% dos valores estão dentro de dois desvios padrão da média.

Neste sentido, Bretas (2019) argumenta que é possível capturar a maioria das variações normais do sistema, excluindo apenas os valores extremos que poderiam distorcer a análise e gerar alarmes falsos.

$$Posição\ do\ Percentil\ 95 = \frac{95}{100}\ \mathrm{X}\ (\mathrm{n} + 1)$$

Onde n representa o número total de observações. Essa abordagem permite identificar limites de controle que refletem melhor o comportamento predominante dos dados, excluindo os valores atípicos que poderiam distorcer a análise.

Penna et al. (2017) e Fusaro (2007) corroboram a necessidade de uma abordagem estatística rigorosa e concordam que a escolha do método adequado depende das características específicas do conjunto de dados e das condições operacionais da barragem. Para eles, o uso de intervalos de confiança de 95% é recomendado, pois abrange a maioria das observações válidas e reflete o comportamento esperado da estrutura, ao passo que a exclusão de outliers é fundamental para evitar interpretações equivocadas. No entanto, destacam que a definição precisa dessas zonas de controle deve considerar também a frequência e a magnitude dos eventos monitorados, o que implica em uma análise contínua e dinâmica dos dados coletados.

A perspectiva integrada desses autores demonstra que a definição de níveis de controle não deve ser estática, mas adaptativa, ajustando-se conforme novas informações e dados são coletados e analisados. A abordagem recomendada é multifacetada, combinando diversas técnicas estatísticas para garantir que os níveis de controle sejam robustos e reflitam com precisão as condições reais da barragem. Desse modo, são assegurados tanto a detecção precoce de problemas quanto o planejamento eficaz de intervenções preventivas e corretivas.

Sendo assim, a definição de zonas de consistência e inconsistência, conforme proposto por Penna et al. (2017) e Fusaro (2007), bem como a utilização de técnicas estatísticas para o tratamento de outliers e a delimitação de intervalos de controle, como sugerido por Bretas (2019), representa uma abordagem para definição de controles e, consequentemente, segurança de barragens. Essa metodologia, ao

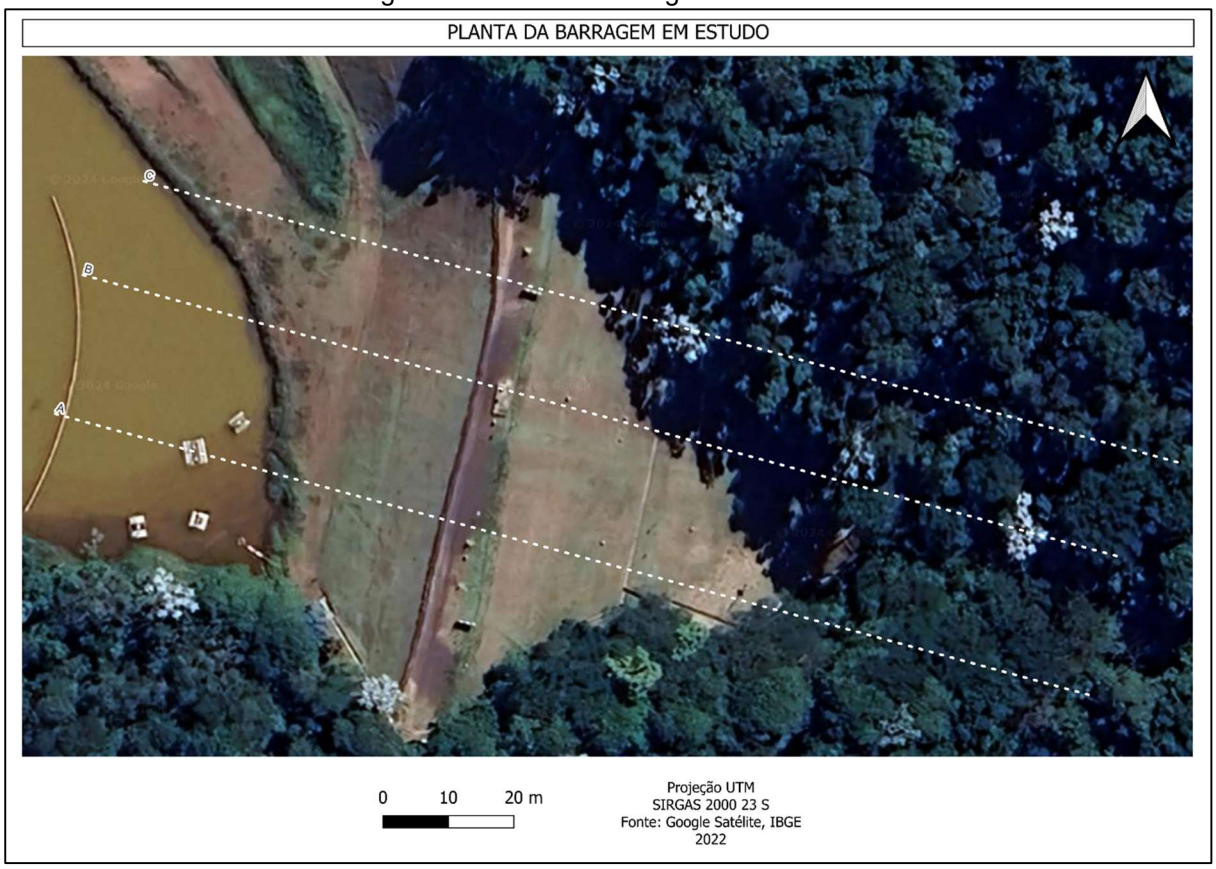
combinar média, desvio padrão, percentis, mediana e testes de hipóteses, permite uma análise mais precisa e adaptável, garantindo que as estruturas operem dentro de parâmetros seguros e minimizando os riscos de falhas estruturais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Barragem em Estudo

A barragem em estudo foi projetada para a contenção de sedimentos provenientes de uma mina de minério de ferro localizada no quadrilátero ferrífero. A estrutura foi construída em etapa única, não possui alteamentos, e possui uma altura máxima de aproximadamente 20 metros. Para melhor entendimento da estrutura foram traçadas três seções geológicas que serão apresentadas no decorrer do trabalho. Na Figura 7 é apresentada a planta estrutura.

Figura 7 - Planta da Barragem em estudo



Fonte: O autor (2024)

3.2 Instrumentos

A estrutura em estudo é monitorada por 16 instrumentos, sendo eles:

- 8 piezômetros casagrande: 6 automatizados e 2 manuais;
- 6 indicadores de nível d'água automáticos;
- 1 pluviômetro manual;
- 1 régua de reservatório manual.

É importante ressaltar que os instrumentos PZ05 e PZ06 possuem leituras manuais, desta forma, a frequência de registro dos dados é consideravelmente menor, sendo de aproximadamente uma leitura a cada dez dias. Os demais instrumentos possuem uma frequência de seis leituras por dia.

Nas Tabela 1 e Tabela 2 são apresentados os dados mais relevantes de cada instrumento para a elaboração deste trabalho.

Tabela 1 – Dados Cadastrais dos Piezômetros da Barragem em Estudo.

Código do Instrumento	Cota de Topo	Cota de Fundo	Profundidade (m)
PZ01	534,71	524,58	10,13
PZ02	534,70	516,14	18,56
PZ03	524,52	506,87	17,65
PZ04	516,16	506,82	9,34
PZ05	534,94	499,26	35,68
PZ06	535,06	499,74	35,32
PZ07	534,96	502,96	32,00
PZ08	534,96	514,96	20,00

Fonte: O autor (2024)

Tabela 2 – Dados Cadastrais dos Indicadores de Nível D'água da Barragem Piloto.

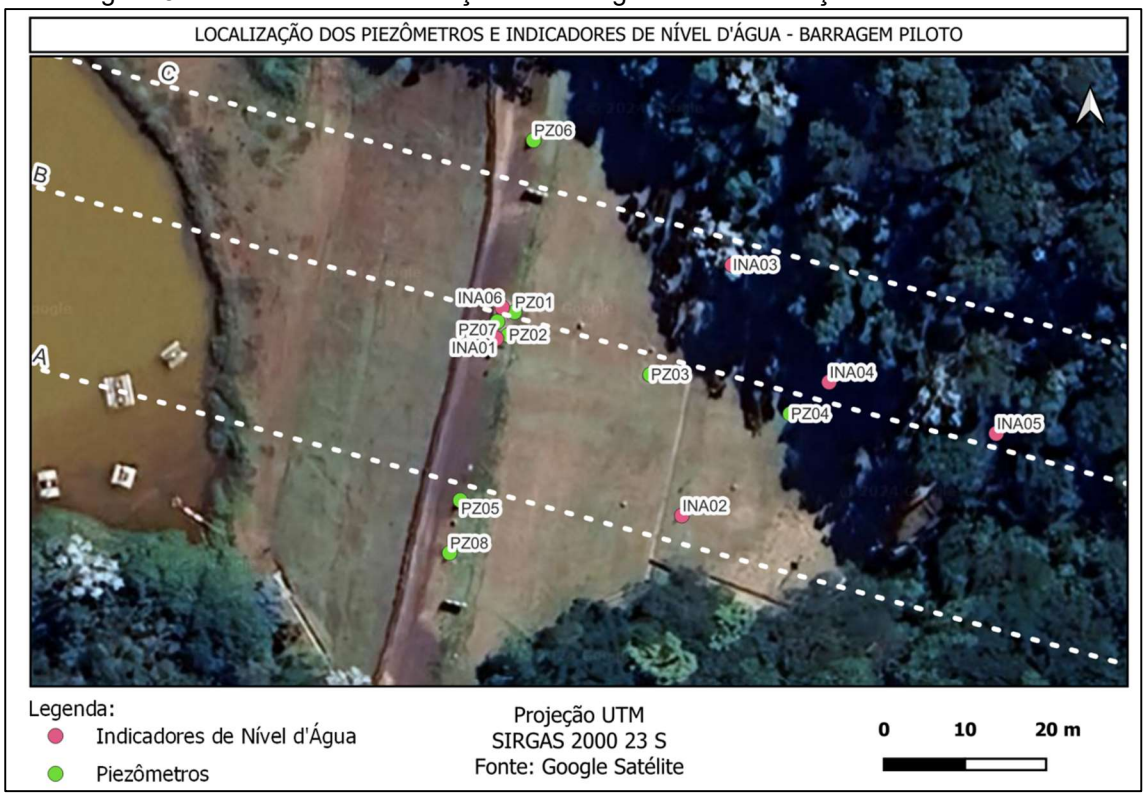
Código do Instrumento	Cota de Topo	Cota de Fundo	Profundidade (m)
INA01	534,96	511,41	23,55
INA02	521,84	516,21	5,63
INA03	522,18	510,76	11,42
INA04	514,53	509,6	4,93
INA05	510,39	507,26	3,13

INA06	534,99	505,99	29,00

Fonte: O autor (2024)

Na Figura 8 é apresentada a planta instrumentada da barragem.

Figura 8 - Planta de instrumentação da Barragem Piloto – locação dos PZ's e INA's

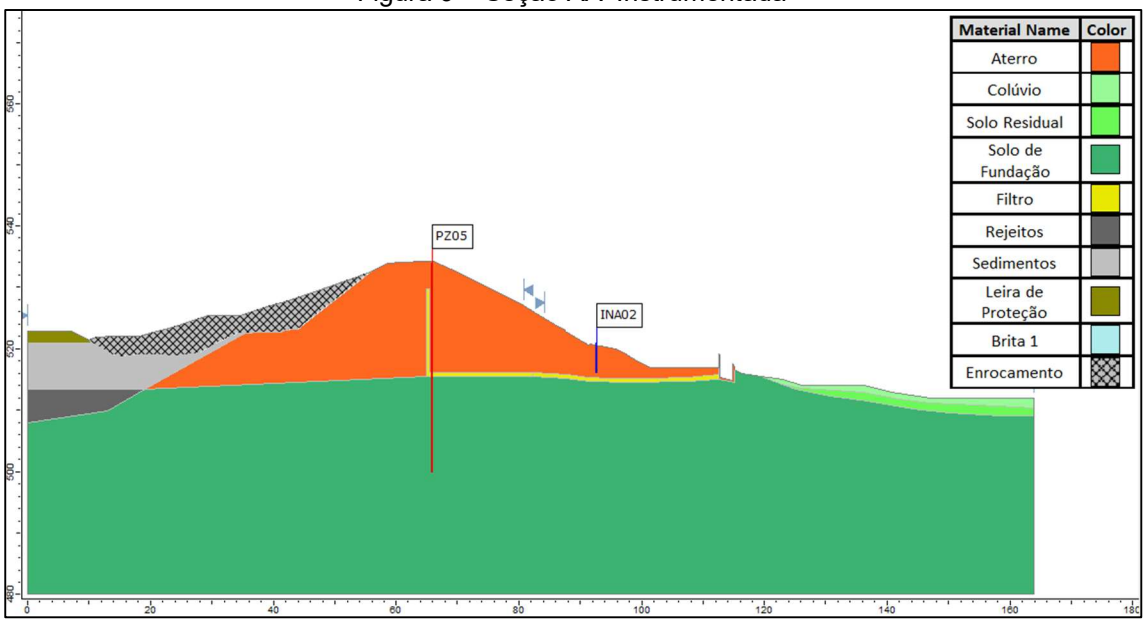


Fonte: O autor (2024)

A planta da barragem em estudo mostra que a maioria dos instrumentos está localizada na seção BB, correspondente à seção central da barragem. Isso pode ser justificado pelo fato de que os responsáveis pelo monitoramento buscam analisar os dados das leituras sem a influência das contribuições freáticas das ombreiras esquerda e direita da barragem. Dessa forma, é possível obter uma avaliação mais precisa do comportamento do maciço central, onde a estabilidade e a percolação são aspectos críticos. Também é importante ressaltar que o instrumento PZ08 não foi projetado nas seções instrumentadas uma vez que este está alinhado ao PZ05 e este possui dados consistentes e está mais próximo da Seção AA' não houve necessidade do PZ08 ser representado em seção.

Nas figuras a seguir são apresentadas as seções instrumentadas da estrutura.

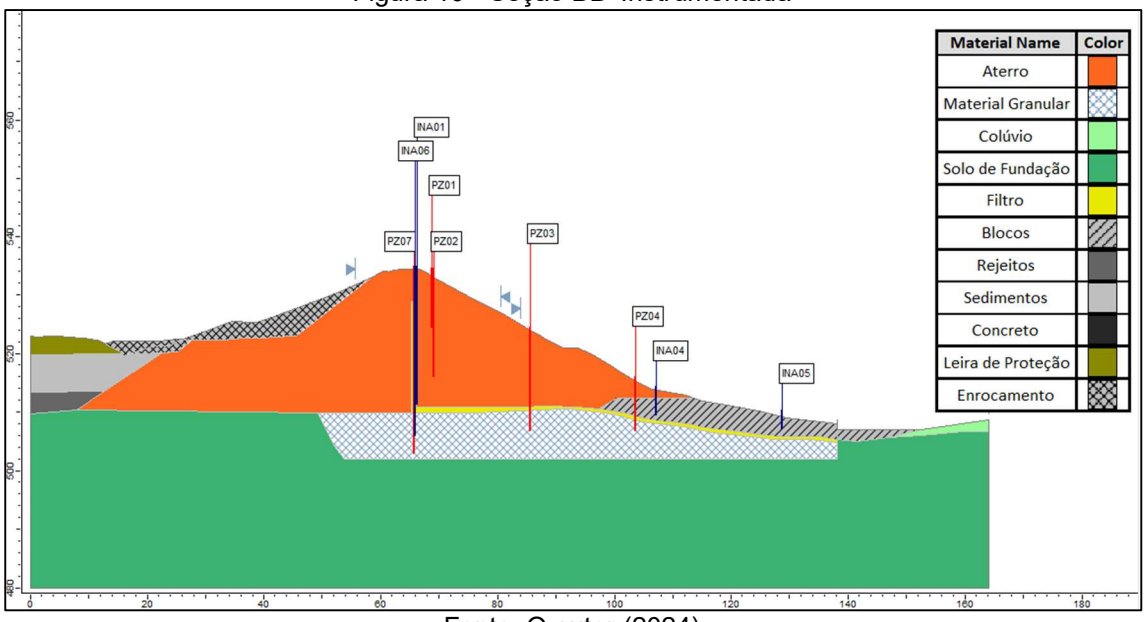
Figura 9 – Seção AA’ Instrumentada



Fonte: O autor (2024)

Os instrumentos PZ05 e INA02 são locados na Seção AA’, próxima à ombreira direita. Conforme a Figura 9, observa-se que o instrumento PZ05 é instalado na fundação e já o instrumento INA02 é instalado no maciço da estrutura.

Figura 10 - Seção BB’ Instrumentada



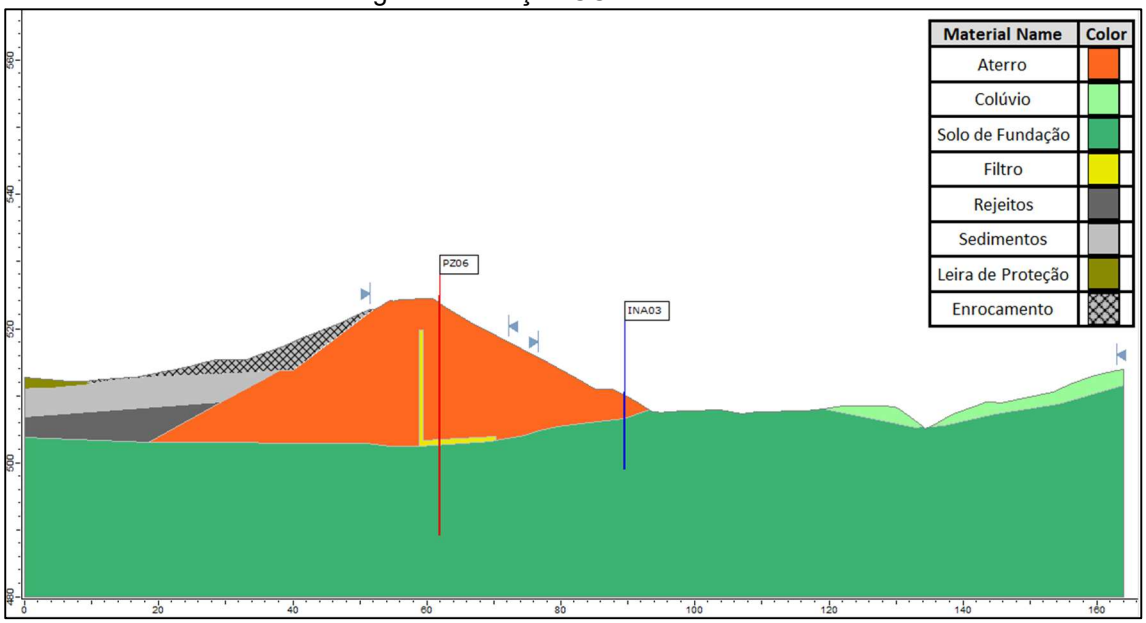
Fonte: O autor (2024)

Conforme Figura 10, a seção BB’, situada na região central da estrutura, é instrumentada pelos seguintes equipamentos:

- INA01, PZ01, PZ02, instalados no maciço;
- INA07, PZ03, e PZ04, localizados no material granular;
- PZ07, instalado na fundação;

- INA04 e INA05, nos blocos a jusante da estrutura.

Figura 11 - Seção CC' Instrumentada



Fonte: O autor (2024)

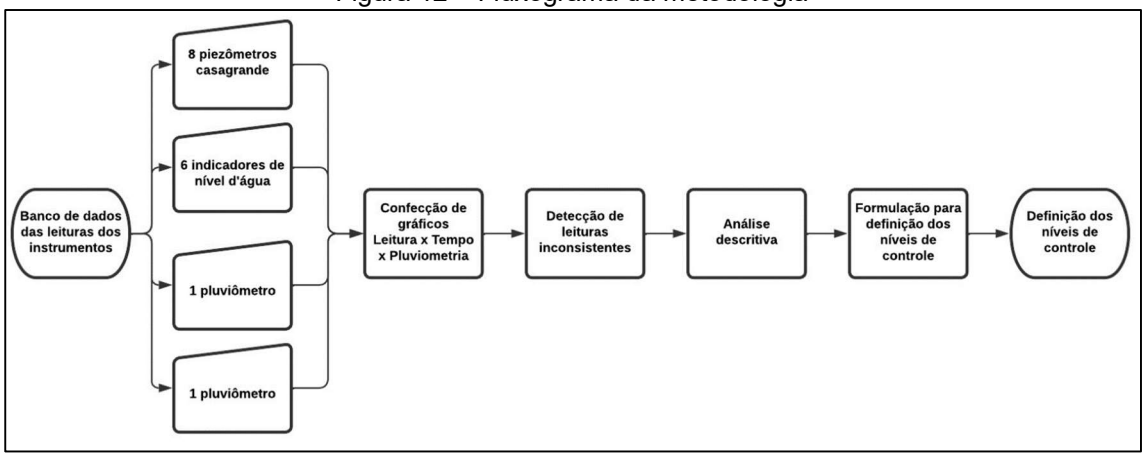
Os instrumentos PZ06 e INA03 são locados na Seção CC', próxima à ombreira esquerda. Conforme a Figura 11, observa-se que ambos os instrumentos são instalados na fundação da estrutura.

Observa-se que os instrumentos INA01, INA02, INA03, INA04, PZ01, PZ02 e PZ08 permaneceram secos ao longo de todo o período analisado. Esse comportamento pode ser explicado pela presença do material granular sob a seção central da barragem (seção BB'). Esse material, por ser mais permeável que os demais componentes da barragem, facilita a percolação da linha freática através dessa região, o que mantém os instrumentos, instalados em cotas de fundo relativamente superiores que este material, secos.

3.3 Metodologia

Partido das informações supracitadas, a metodologia deste estudo seguiu os parâmetros estabelecidos no Fluxograma expresso na Figura 12, tendo como ponto de partida o acesso ao banco de dados e se estendo até a definição dos níveis de controle. De modo a clarificar todo o percurso traçado, as subseções seguintes explicam os aspectos inerentes a elas.

Figura 12 – Fluxograma da metodologia



Fonte: O autor (2024)

3.3.1 Banco de Dados

O banco de dados utilizado neste estudo é composto por 44.468 amostras, coletadas ao longo de um período de quatro anos (de junho de 2020 a junho de 2024). A instrumentação da barragem em estudo inclui um total de 16 dispositivos, sendo oito piezômetros Casagrande (PZ), dos quais seis são automatizados e dois manuais, além de seis indicadores de nível d'água (INA) automáticos, um pluviômetro manual e uma régua de reservatório manual. Cada instrumento possui uma frequência de amostragem distinta, com os piezômetros automatizados e indicadores de nível d'água gerando aproximadamente seis leituras por dia, enquanto os instrumentos manuais, como o PZ05 e o PZ06, fornecem uma leitura a cada dez dias, aproximadamente. Esses dados permitiram o monitoramento contínuo e detalhado da barragem, fornecendo subsídios para as análises realizadas.

3.3.2 Gráficos de leituras x tempo x pluviometria

Os gráficos de leituras x tempo x pluviometria foram elaborados através do *Microsoft Excel* com o objetivo de visualizar as correlações entre as medições dos instrumentos e os eventos pluviométricos ocorridos durante o período de monitoramento. Para isso, foram plotados gráficos que relacionam a variação das leituras dos piezômetros, da régua do reservatório e dos indicadores de nível d'água com o tempo, considerando também as medições pluviométricas obtidas pelo pluviômetro manual. Essa abordagem permitiu identificar padrões de resposta dos instrumentos às variações pluviométricas e possíveis alterações no comportamento

da barragem devido ao aumento ou diminuição das chuvas, com a visualização clara dos picos de leitura associados aos eventos chuvosos mais intensos.

3.3.3 Detecção de leituras inconsistentes

A detecção de leituras inconsistentes foi realizada como uma etapa preliminar para garantir a integridade dos dados a serem analisados. Para tanto, foi considerado como inconsistência qualquer valor discrepante que não estivesse alinhado ao comportamento histórico do instrumento, ou seja, valores muito acima ou abaixo do padrão observado. Foram excluídas, por exemplo, leituras que apresentavam valores inferiores à cota de fundo dos instrumentos ou registros abruptamente altos em relação às medições anteriores e subsequentes, considerados erros de medição. Dessa forma, as leituras inconsistentes foram desconsideradas nas análises posteriores, assegurando que os cálculos estatísticos refletissem a realidade operacional da barragem.

3.3.4 Análise descritiva

A análise descritiva dos dados foi conduzida para fornecer uma visão geral do comportamento dos instrumentos ao longo do tempo, incluindo a definição de parâmetros estatísticos como a leitura máxima, mínima, média, desvio padrão e o percentil de 95%. Esse procedimento foi realizado com o intuito de identificar as variações naturais das leituras e fornecer uma base robusta para a posterior definição dos níveis de controle. A análise descritiva foi realizada com o auxílio de ferramentas estatísticas no Microsoft Excel, que permitiram o cálculo automatizado desses parâmetros para cada um dos instrumentos monitorados. A utilização do percentil de 95% foi particularmente importante, pois tomou-se como referência os níveis de modo a evitar os valores extremos, em decorrência de condições climáticas, fornecendo, portanto, uma base consistente para a definição dos níveis de operação seguros.

3.3.5 Formulação para definição dos níveis de controle

A definição dos níveis de controle foi realizada com base nos resultados da análise descritiva e em uma abordagem estatística aplicada aos dados históricos de

cada instrumento. A fórmula para o cálculo dos níveis de controle foi desenvolvida com o intuito de refletir o comportamento típico dos instrumentos, levando em consideração o desvio padrão amostral (Sx) e o valor de referência definido pelo percentil de 95%. A fórmula de partida utilizada foi a seguinte:

Nível de controle = Nível de referência 95% + **(n.Sx)**

Onde "n" é o fator multiplicador associado ao nível de controle desejado, e "Sx" é o desvio padrão amostral.

A definição de um fator multiplicador é vinculada ao comportamento histórico da instrumentação, cujo valor é atrelado à variação das leituras ao longo do tempo. O fator multiplicador é o mesmo para toda a estrutura, mas, ao ser associado ao desvio padrão de cada instrumento, reflete a heterogeneidade dos dados. Instrumentos com um desvio padrão mais elevado indicam uma tendência maior de variação, o que justifica a aplicação de uma margem proporcionalmente maior na definição de seus níveis de segurança. Da mesma forma, instrumentos com desvio padrão menor deve ter uma margem mais restrita, pois qualquer variação significativa pode indicar possíveis anomalias na estrutura. Essa abordagem reflete um julgamento de engenharia que leva em conta as particularidades de cada instrumento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Gráficos Leituras x Tempo x Pluviometria

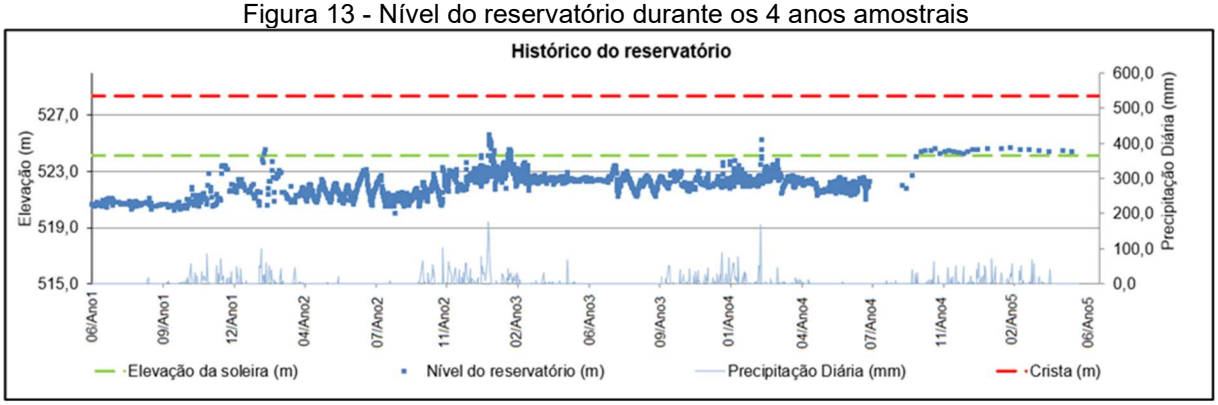
Neste capítulo, são apresentados os gráficos gerados a partir dos dados obtidos no banco de dados, relacionando pluviometria, leituras dos instrumentos e tempo. Esses gráficos permitem uma análise visual da interação entre a quantidade de chuva e o comportamento dos instrumentos instalados na barragem ao longo do período de estudo.

Abaixo de cada gráfico, será feito um breve comentário sobre os principais aspectos observados, destacando possíveis correlações, variações significativas nos dados e comportamentos atípicos que possam ter ocorrido ao longo do tempo. A análise desses resultados será fundamental para entender a influência das chuvas no comportamento da barragem e dos instrumentos de monitoramento.

Os gráficos serão apresentados entre a Figura 13 e Figura 21.

- Régua do reservatório:

Figura 13 - Nível do reservatório durante os 4 anos amostrais

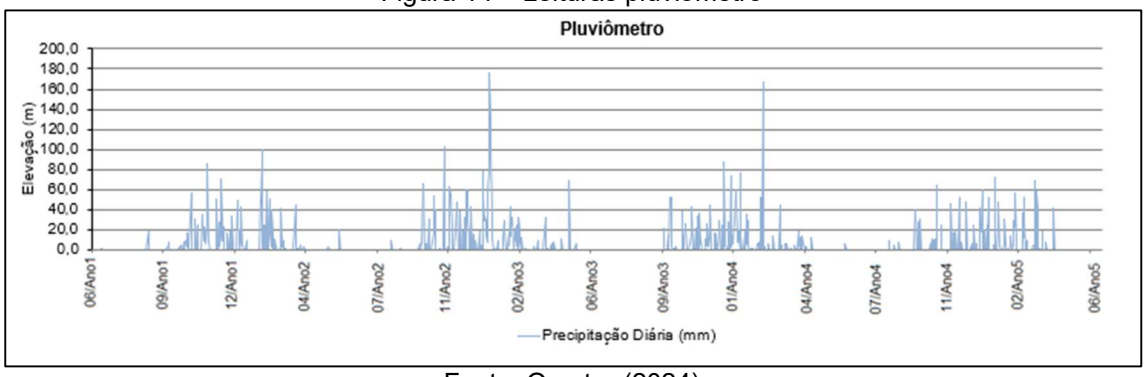


Fonte: O autor (2024)

A partir de uma análise do histórico de leituras, é possível aferir que o reservatório variou aproximadamente seis metros no período em questão. Destaca-se que, tal variação do reservatório é em resposta aos períodos de maior precipitação pluviométrica e que entre julho e novembro do quarto ano o nível do reservatório apresentou um aumento, tendo em vista finalização de um período de manutenções no reservatório.

- Pluviômetro:

Figura 14 – Leituras pluviômetro

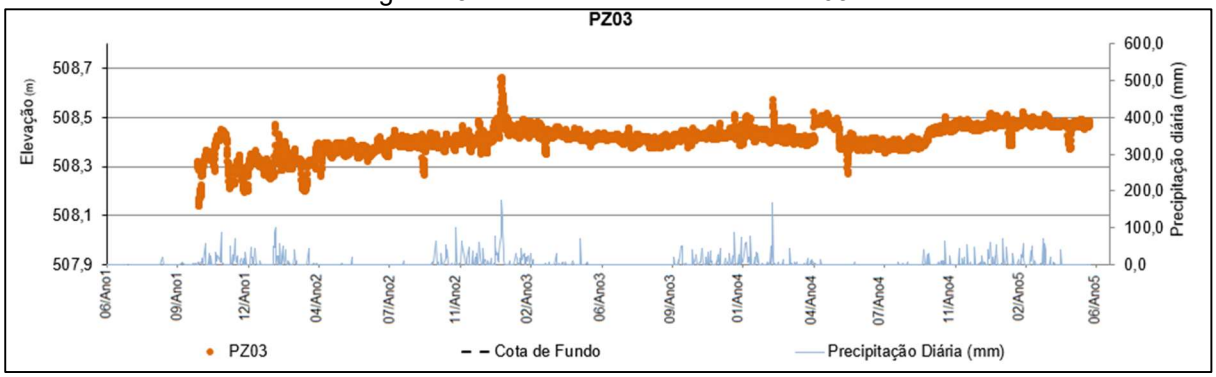


Fonte: O autor (2024)

Neste gráfico é apresentado o índice pluviométrico diário e por ele é possível definir os períodos chuvosos e os períodos secos desta barragem em estudo. A máxima precipitação diária foi de 176,00mm registrada em 08/01/Ano3. No dia 15/02/Ano4 foi registrada a segunda maior leitura histórica, de 167,00mm. No periodo analisado houve uma precipitação acumulada de 7.457,30mm, sendo dados registrados, em sua maioria, nos períodos chuvosos (outubro a maio).

- PZ03:

Figura 15 – Leituras do Instrumento PZ03

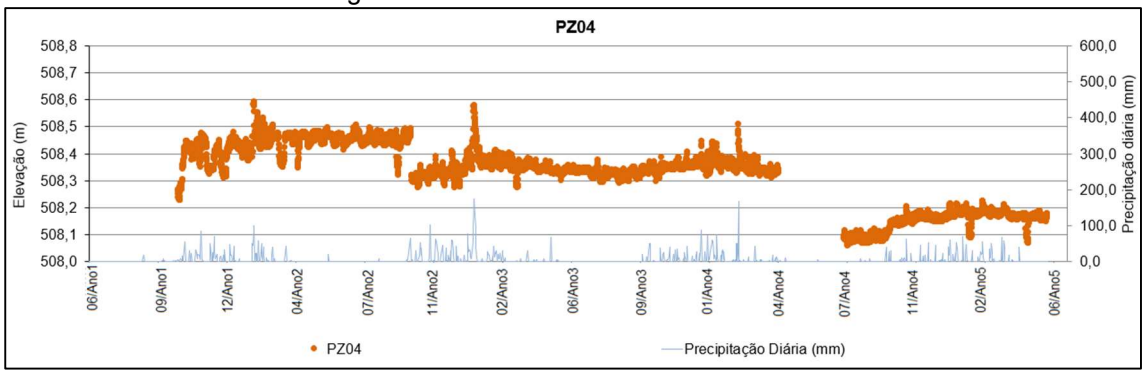


Fonte: O autor (2024)

A análise gráfica revela que este instrumento responde rapidamente aos picos de precipitação, registrando as maiores leituras nos dias de pico chuvosos. Observou-se um aumento nas leituras entre julho e novembro do quarto ano, associado à elevação do nível freático do reservatório.

- PZ04

Figura 16 – Leituras do Instrumento PZ04

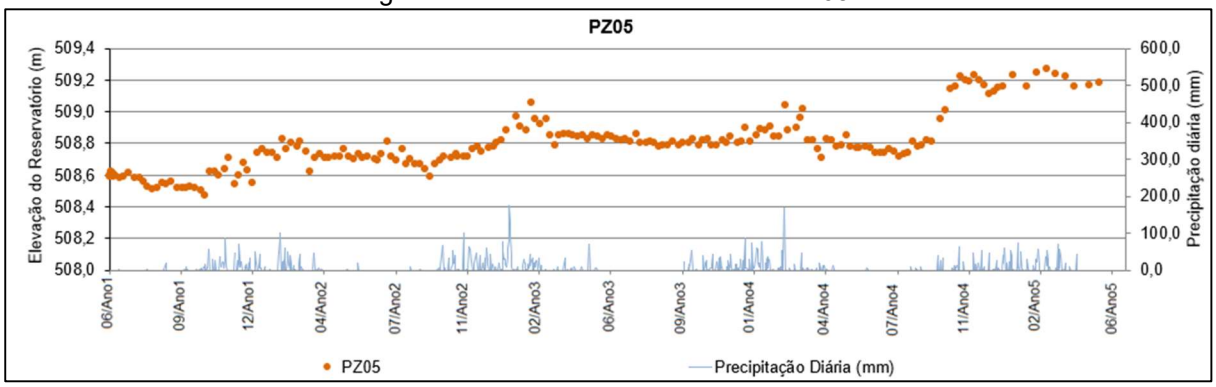


Fonte: O autor (2024)

Neste gráfico é possível observar que o instrumento responde rapidamente aos picos pluviométricos e ao aumento do nível do reservatório. Entretanto este instrumento apresenta uma particularidade em que no dia 19/04/Ano4 apresentou leituras inconsistentes e devido a isso não registrou leituras até o dia 23/07/Ano4, pois foi necessário realizar uma manutenção no sensor. Essas leituras serão apresentadas no Item 4.2.

- PZ05:

Figura 17 – Leituras do Instrumento PZ05

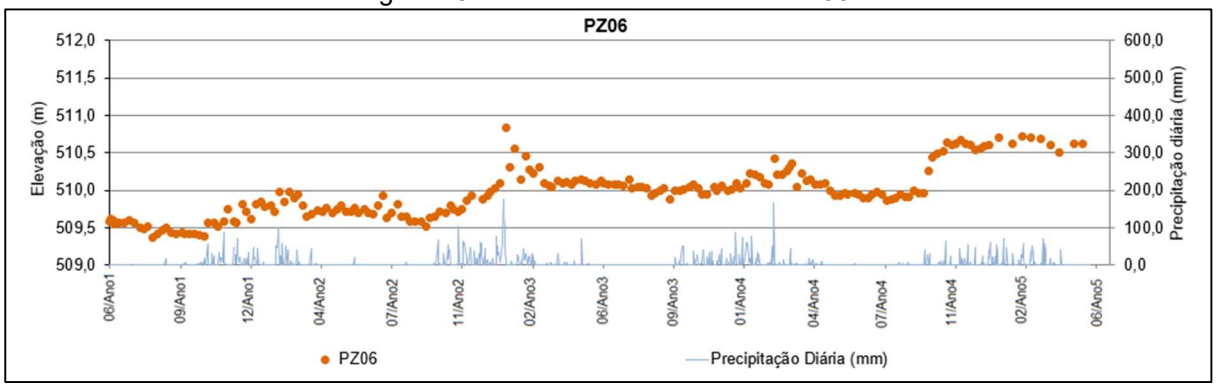


Fonte: O autor (2024)

Este instrumento também apresenta uma resposta imediata aos dias de maior incidência pluviométrica. Todavia, no momento em que houve o aumento do nível freático do reservatório, entre julho e novembro do quarto ano, ele registrou leituras superiores em comparação a maioria dos instrumentos, indicando uma sensibilidade maior às variações no nível do reservatório. Ressalta-se que este instrumento é manual, logo a frequência de leituras é menor.

- PZ06:

Figura 18 – Leituras do Instrumento PZ06

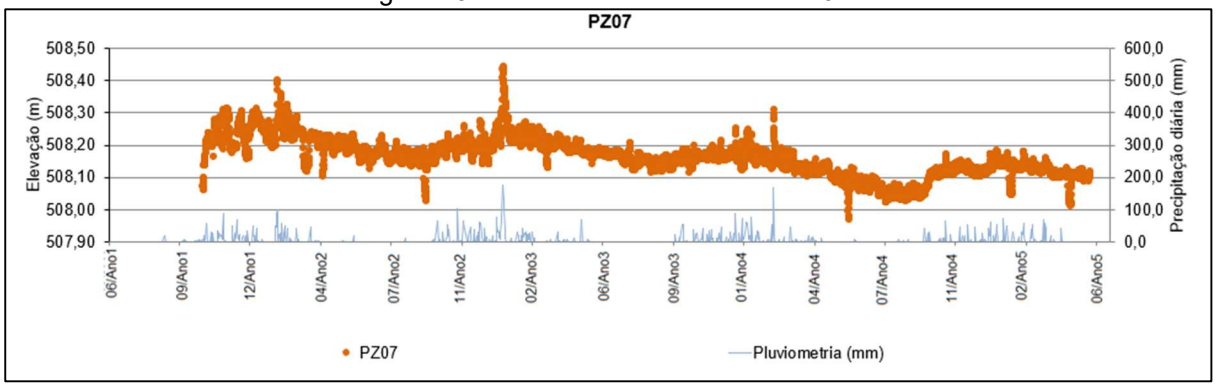


Fonte: O autor (2024)

O instrumento PZ06, apresenta um comportamento semelhante ao PZ05, registrando uma sensibilidade maior ao nível freático do reservatório. Por também se tratar de um instrumento manual, este instrumento apresenta uma frequência de leituras menor.

- PZ07:

Figura 19 – Leituras do Instrumento PZ07

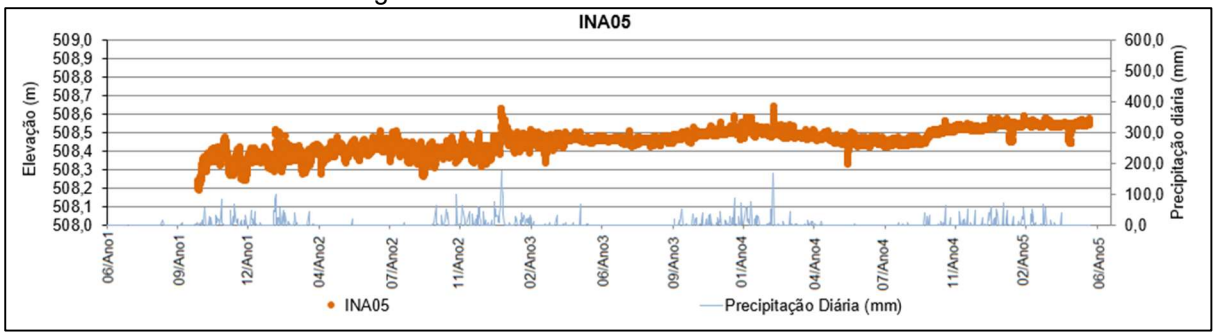


Fonte: O autor (2024)

O instrumento PZ07 responde rapidamente a picos de precipitação, especialmente em períodos de chuvas intensas e há um ajuste na elevação durante e após os maiores eventos de precipitação. Entretanto, há momentos em que as leituras mostram uma estabilidade maior, como é o caso dos períodos seco (abril a setembro).

- INA05:

Figura 20 – Leituras do Instrumento INA05

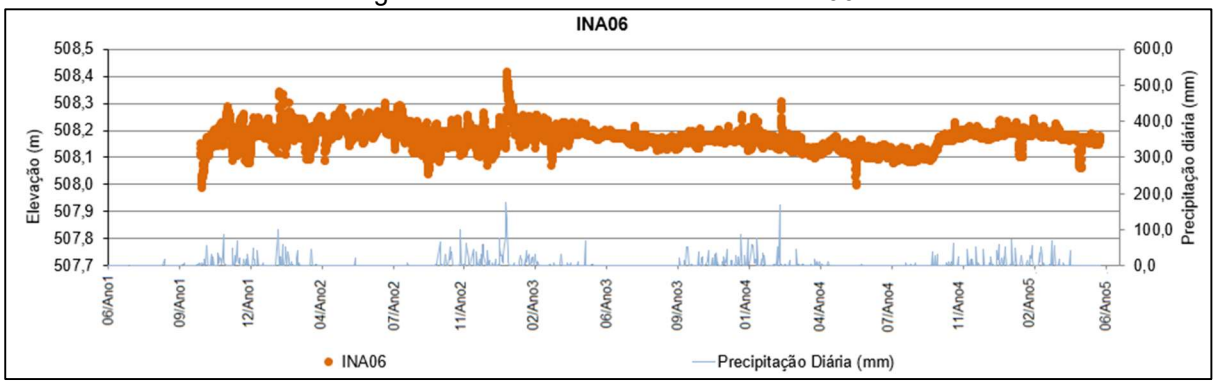


Fonte: O autor (2024)

O instrumento INA05 apresenta, também, uma correlação muito forte com as precipitações e variações do nível freático do reservatório. É possível aferir que suas maiores leituras são coincidentes aos dias de maiores precipitações e que quando o reservatório apresenta um aumento no nível freático, as leituras deste instrumento aumentam.

- INA06:

Figura 21 – Leituras do Instrumento INA06



Fonte: O autor (2024)

Este instrumento apresenta um comportamento semelhante ao INA05, apresentando as maiores leituras nos dias em que houve picos pluviométricos e responde de acordo com a variação do nível do reservatório.

De forma geral, os instrumentos apresentaram um comportamento coerente em relação às variações de pluviometria e ao nível d'água do reservatório. Os gráficos apresentados já foram ajustados, com a exclusão de leituras consideradas inconsistentes, de modo a facilitar a interpretação dos dados. Essas leituras inconsistentes serão detalhadas no Item 4.2.

Adicionalmente, os instrumentos que permaneceram secos durante todo o período de análise não tiveram gráficos plotados, uma vez que não registraram leituras ao longo de todo o estudo.

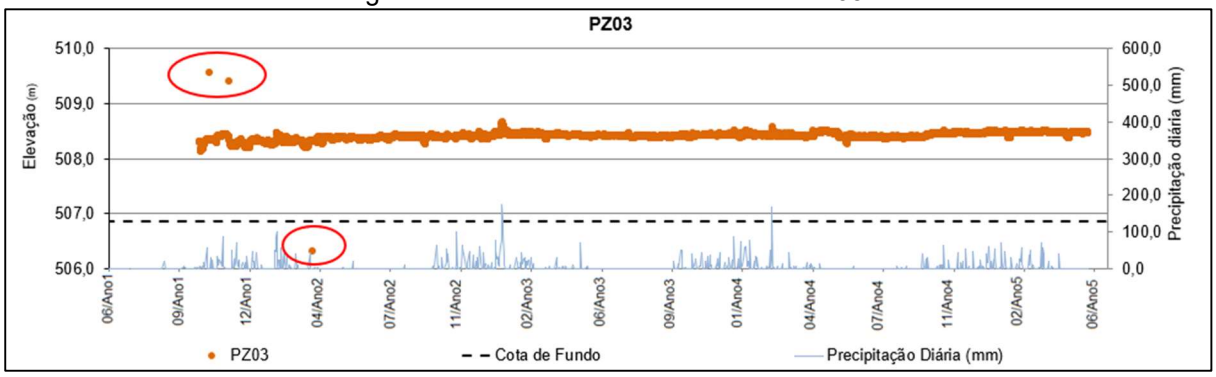
4.2 Detecção de Leituras Inconsistentes

Neste capítulo, foi realizada uma análise individual dos instrumentos que apresentaram leituras inconsistentes. Para cada gráfico, foram avaliadas as leituras discrepantes em relação ao histórico de medições, considerando possíveis causas, como erros de medição manual ou falhas no sistema automatizado. Essas leituras inconsistentes foram analisadas e desconsideradas nas análises posteriores, de forma a garantir a precisão dos cálculos dos níveis de controle e assegurar que os resultados reflitam o comportamento real da estrutura monitorada.

Da Figura 22 a Figura 24, são apresentados os gráficos dos instrumentos com leituras inconsistentes.

- PZ03:

Figura 22 – Leituras inconsistentes do PZ03



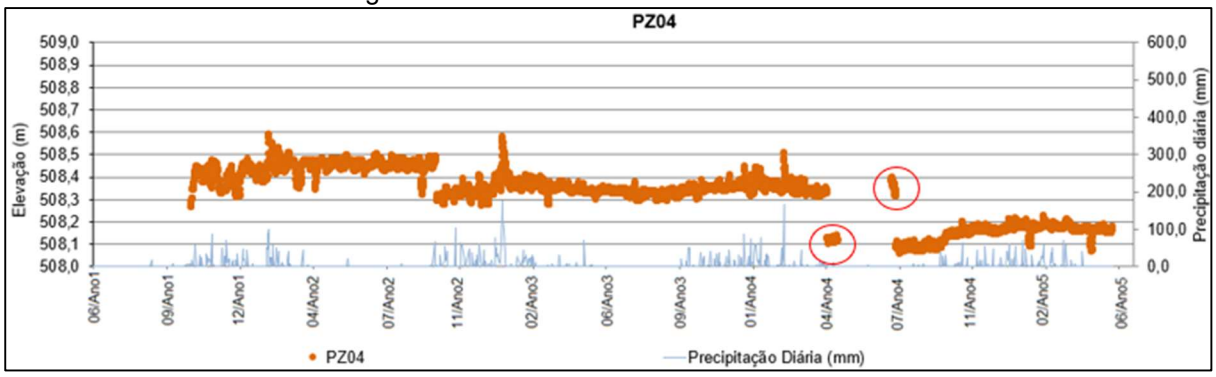
Fonte: O autor (2024)

As três leituras destacadas no gráfico acima foram excluídas das análises para garantir que o estudo considerasse apenas os registros reais da estrutura, evitando que esses valores interferissem nos cálculos dos níveis de controle do instrumento. As leituras dos dias 29/10/Ano1 e 27/11/Ano1 apresentaram valores anormalmente elevados, possivelmente relacionados a erros de medição gerados pelo sistema automatizado do instrumento.

Além disso, a leitura de 28/03/Ano2 registrou um valor abaixo da cota de fundo, o que reforça a hipótese de falha no sistema automatizado, já que o instrumento não pode registrar leituras inferiores à sua cota mínima.

- PZ04:

Figura 23 – Leituras inconsistentes do PZ04



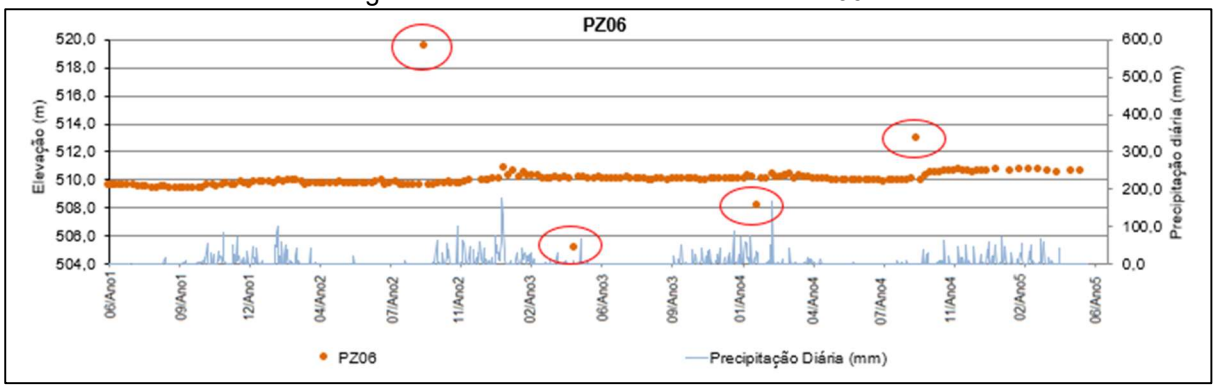
Fonte: O autor (2024)

Como mencionado no Item 4.1, no dia 19/04/Ano4, o instrumento registrou leituras discrepantes em relação aos dados anteriores. Após essa data, ele deixou de apresentar leituras até o dia 23/07/Ano4, devido a uma manutenção realizada em seu sensor.

O instrumento foi novamente comissionado em 23/07/Ano4 e, como é comum após a reinstalação, os primeiros dias apresentaram leituras inconsistentes até que o instrumento atingisse o equilíbrio hidrostático. Por esse motivo, foram desconsideradas 129 leituras realizadas entre os dias 23/07 e 25/07/Ano4, a fim de evitar interferências nos cálculos dos níveis de controle.

- PZ06:

Figura 24 – Leituras inconsistentes do PZ06



Fonte: O autor (2024)

As quatro leituras destacadas foram consideradas inconsistentes, pois se diferem significativamente do histórico de medições do instrumento. Como o instrumento é manual, esses valores podem ter sido resultado de erro de medição por parte do operador ou falha no input dos dados no sistema. Portanto, essas leituras foram desconsideradas das análises subsequentes, a fim de evitar interferências nos cálculos dos níveis de controle.

Após a exclusão das leituras inconsistentes, assegurou-se que os dados são confiáveis e foi possível partir para análise descritiva das leituras dos instrumentos.

4.3 Análise descritiva

Foi realizada uma análise descritiva dos dados de cada instrumento, a qual incluiu a definição dos valores de leitura máxima, mínima, média, o cálculo do desvio padrão, e a leitura correspondente ao percentil de 95%. Esses parâmetros permitem uma avaliação detalhada do comportamento dos instrumentos ao longo do período de monitoramento, fornecendo uma visão clara da variação e da consistência das leituras registradas.

Os resultados dessa análise descritiva serão representados na Tabela 3 e foram representados graficamente entre a Figura 25 e Figura 31, de forma a facilitar

a visualização e compreensão dos dados. Vale ressaltar que, para os instrumentos que permaneceram secos durante o período analisado, essa análise não foi possível, uma vez que não apresentaram leituras no intervalo de tempo considerado.

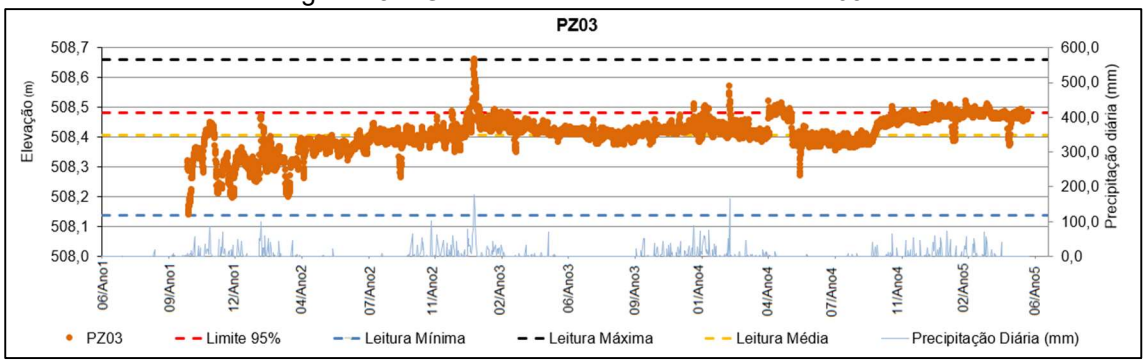
Tabela 3 – Valores estatísticos dos instrumentos

Seção	Código do Instrumento	Desvio Padrão	Leitura Mínima	Leitura Média	Leitura Máxima	Leitura 95%
AA’	PZ05	0,20	508,47	508,79	509,27	509,11
	INA06	0,04	507,77	508,17	508,41	508,24
	INA05	0,06	508,19	508,45	508,64	508,55
BB”	PZ03	0,06	508,14	508,41	508,66	508,48
	PZ04	0,12	508,06	508,31	508,58	508,47
	PZ07	0,06	507,97	508,16	508,44	508,26
CC’	PZ06	0,33	509,36	509,95	510,83	510,61

Fonte: O Autor (2024)

- PZ03:

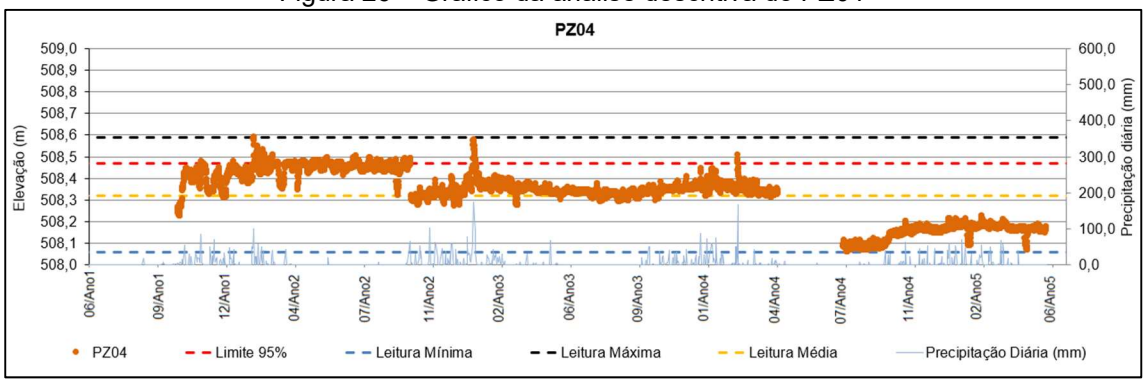
Figura 25 – Gráfico da análise descritiva do PZ03



Fonte: O autor (2024)

- PZ04:

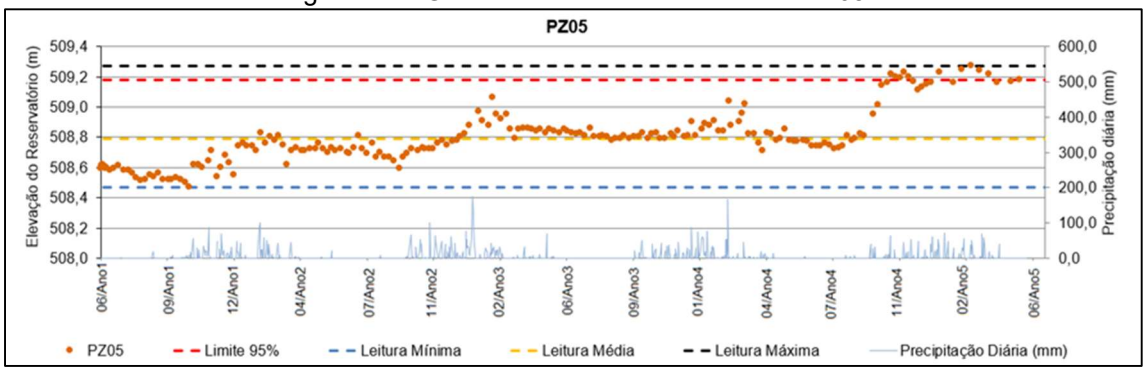
Figura 26 – Gráfico da análise descritiva do PZ04



Fonte: O autor (2024)

- PZ05:

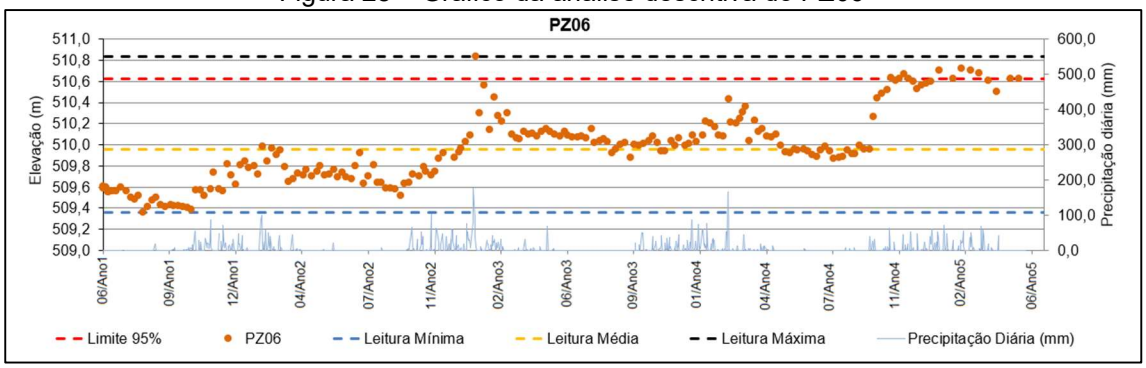
Figura 27 – Gráfico da análise descritiva do PZ05



Fonte: O autor (2024)

- PZ06:

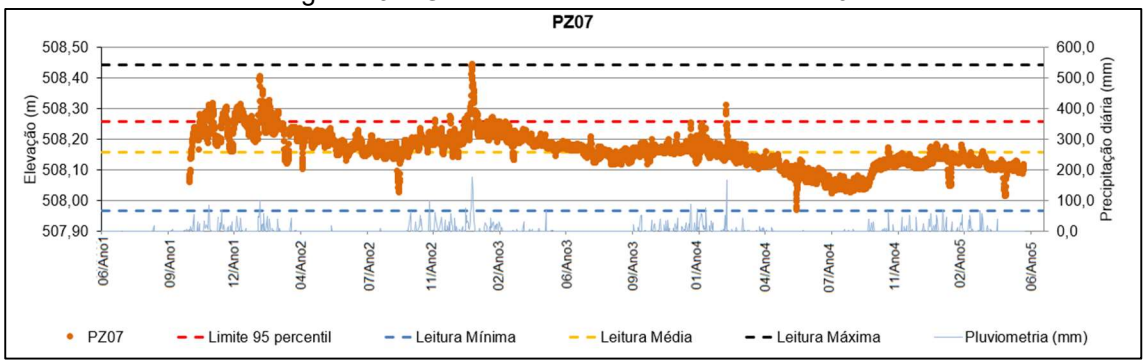
Figura 28 – Gráfico da análise descritiva do PZ06



Fonte: O autor (2024)

- PZ07:

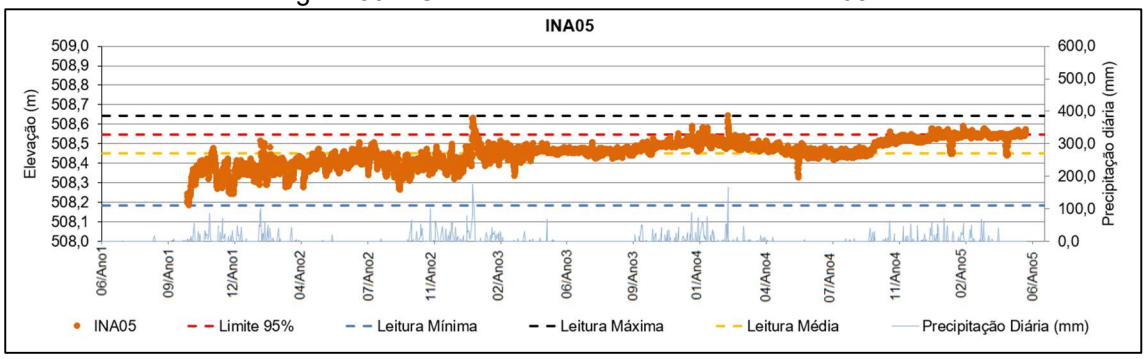
Figura 29 – Gráfico da análise descritiva do PZ07



Fonte: O autor (2024)

- INA05:

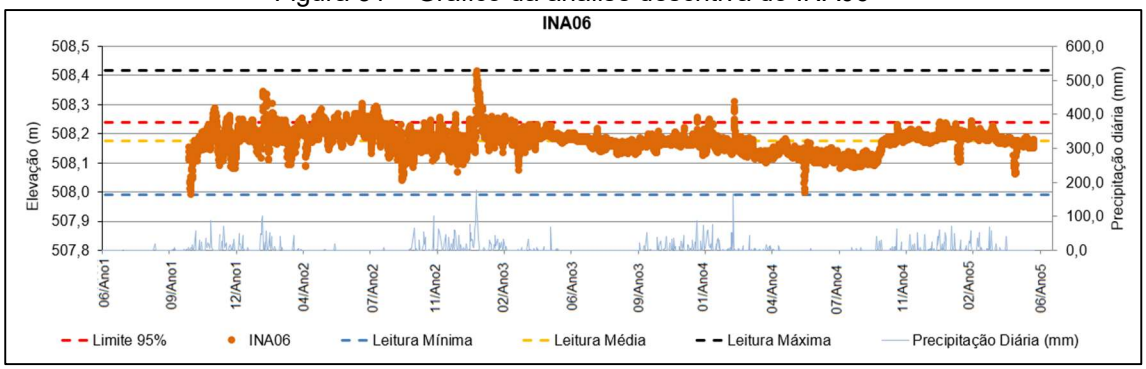
Figura 30 – Gráfico da análise descritiva do INA05



Fonte: O autor (2024)

- INA06:

Figura 31 – Gráfico da análise descritiva do INA06



Fonte: O autor (2024)

A análise dos gráficos e seus valores plotados evidencia a sensibilidade dos instrumentos à precipitação pluviométrica. De forma geral, as maiores leituras ocorreram em dias com picos pluviométricos, enquanto as leituras mínimas foram registradas em períodos de seca.

Um ponto importante a ser discutido são os valores de desvio padrão obtidos. Os instrumentos PZ05 e PZ06 apresentaram os maiores desvios padrões, o que pode ser explicado por suas localizações próximas às ombreiras e ao reservatório. Estar posicionados nas ombreiras faz com que esses instrumentos recebam contribuições freáticas do terreno natural, o que pode interferir nas leituras e aumentar a variabilidade dos dados, resultando em um desvio padrão mais elevado.

Além disso, o fato de PZ05 e PZ06 serem os únicos instrumentos manuais também contribui para seus maiores valores de desvio padrão. A baixa frequência de leituras nesses instrumentos faz com que as variações entre medições sucessivas sejam mais acentuadas, o que aumenta a dispersão dos dados. Como há menos pontos de coleta ao longo do tempo, é mais difícil capturar a continuidade e o

comportamento dinâmico das variações da linha freática, o que resulta em um desvio padrão mais elevado. Em outras palavras, a menor frequência pode deixar de registrar flutuações intermediárias que suavizariam as diferenças entre as medições, contribuindo para a elevação do desvio padrão.

4.4 Formulação para definição dos níveis de controle e resultados

A partir da fórmula exposta anteriormente, é proposto a obtenção de níveis de controle para a instrumentação da Barragem em estudo a partir da variação do valor de “n” para cada nível a ser atingido.

Para este trabalho foi utilizado a seguinte relação entre o valor de “n” e os níveis de controle:

Nível normal = Nível de controle < Nível de atenção
Nível de atenção = Nível de referência 95% + **(n.Sx)**
Nível de alerta = Nível de referência 95% + **(2n.Sx)**
Nível de emergência = Nível de referência 95% + **(4n.Sx)**

As fórmulas para os níveis de controle dos instrumentos foram definidas com base no desvio padrão amostral (Sx), na leitura de referência (95 percentil) e a relação entre os valores de "n" foi obtida através de uma análise de sensibilidade. A decisão de que a margem entre o nível de emergência e o nível de alerta deve ser o dobro da margem entre o nível de atenção e o nível de alerta baseia-se em princípios de gestão de risco e segurança.

Essa configuração tem como objetivo proporcionar um escalonamento progressivo, permitindo a intervenção adequada em cada estágio de alerta. A fórmula reflete a necessidade de uma resposta mais rápida e precisa à medida que o comportamento da barragem se aproxima de situações de maior risco, garantindo que as medidas sejam tomadas com antecedência, evitando ações precipitadas e minimizando falsos alarmes.

Adicionalmente, o fato de a janela entre os níveis de atenção e alerta ser menor é benéfico, pois permite que o sistema gere sinais ágeis, proporcionando uma tomada de decisão mais rápida em situações menos críticas. Isso facilita a implementação de ações preventivas antes que a situação se agrave, otimizando a gestão e o controle da barragem sem comprometer sua operação.

Assim, o aumento da margem entre os níveis de alerta e emergência oferece uma janela maior para respostas mais drásticas em cenários de risco elevado, enquanto a menor margem entre os níveis de atenção e alerta garante um monitoramento mais sensível e eficiente em cenários menos graves.

No caso dos instrumentos secos, apenas o nível de atenção será definido, uma vez que não há dados disponíveis para realizar uma análise completa dos níveis de controle, como nos demais instrumentos. Para esses instrumentos, a relação do nível de atenção será estabelecida com base em uma referência simples:

Nível de atenção = Cota de fundo + 0,5 metros.

Esse critério foi adotado considerando que, mesmo em situações onde o instrumento permaneça seco durante todo o período de monitoramento, é importante manter um nível de controle básico que permita detectar qualquer alteração significativa na condição do maciço. Dessa forma, o nível de atenção serve como uma primeira linha de alerta caso haja indícios de um aumento no nível freático próximo à cota de fundo do instrumento, garantindo um monitoramento mínimo e eficaz.

O instrumento INA05, localizado no pé da barragem, tem uma função crítica no monitoramento do comportamento da estrutura. Em condições normais, esse instrumento tende a permanecer em equilíbrio hidrostático, uma vez que está posicionado em uma área onde a linha freática tende a se estabilizar com o tempo. O comportamento histórico desse instrumento demonstra pouca variação significativa, o que reforça a expectativa de estabilidade.

No entanto, caso o INA05 apresente leituras superiores ao esperado, pode ser um sinal de uma anomalia. Como o pé da barragem é uma área de grande importância estrutural, uma elevação no nível freático ou uma mudança abrupta nas leituras desse instrumento pode indicar a presença de infiltrações anormais, aumento de pressão por saturação, ou até mesmo a possibilidade de *piping*, um fenômeno que ocorre quando a água começa a carrear partículas do solo, abrindo caminho para erosões internas na barragem.

Essas situações são perigosas, pois podem comprometer a estabilidade do maciço, especialmente em regiões como o pé da barragem, que suportam a maior parte da carga e da pressão. Por isso, foi decidido que para o INA05 será definido apenas o nível de emergência, uma vez que qualquer variação significativa nas suas leituras representa um cenário de risco elevado e exige respostas imediatas.

Dessa forma, o monitoramento desse instrumento é essencial, pois ele funciona como um indicador direto de condições críticas que poderiam comprometer a segurança da barragem. Um aumento inesperado nas leituras do INA05 deve ser tratado com prioridade máxima, exigindo uma investigação rápida e ações corretivas para evitar o desenvolvimento de uma falha estrutural mais grave.

A partir dos fatos apresentados, foi feito uma análise de sensibilidade e diversas combinações de valores para “n” foram testados. No entanto, chegou-se aos três resultados mais promissores. Na Tabela 4 é apresentado o valor de ‘n” para cada resultado e nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 são apresentados os valores dos níveis de controle para cada instrumento.

Tabela 4 – Relação dos valores de “n” de cada nível para os três resultados promissores

RESULTADO	n NÍVEL ATENÇÃO	n NÍVEL ALERTA	n NÍVEL EMERGÊNCIA
1	1	2	4
2	3	6	12
3	8	16	32

Fonte: O autor (2024)

Tabela 5 – Níveis de controle de INA's e PZ's referentes ao Resultado 1

NOME DO INSTRUMENTO	95 PERCENTIL	NÍVEL NORMAL	NÍVEL DE ATENÇÃO n = 1	NÍVEL DE ALERTA n = 2	NÍVEL DE EMERGÊNCIA n = 4
PZ05	509,11	Nível < 509,31	509,31 ≤ Nível < 509,51	509,51 ≤ Nível < 509,92	Nível ≥ 509,92
PZ06	510,61	Nível < 510,94	510,94 ≤ Nível < 511,27	511,27 ≤ Nível < 511,94	Nível ≥ 511,94
PZ03	508,48	Nível < 508,54	508,54 ≤ Nível < 508,59	508,59 ≤ Nível < 508,71	Nível ≥ 508,71
PZ07	508,26	Nível < 508,32	508,32 ≤ Nível < 508,37	508,37 ≤ Nível < 508,49	Nível ≥ 508,49
INA06	508,24	Nível < 508,28	508,28 ≤ Nível < 508,32	508,32 ≤ Nível < 508,41	Nível ≥ 508,41
PZ04	508,47	Nível < 508,59	508,59 ≤ Nível < 508,71	508,71 ≤ Nível < 508,94	Nível ≥ 508,94
INA05	508,55	Nível < 508,61	-	-	Nível ≥ 508,61
INA02	N/A	Nível < 516,21	Nível ≥ 516,21	-	-
INA01	N/A	Nível < 511,91	Nível ≥ 511,91	-	-
PZ01	N/A	Nível < 525,08	Nível ≥ 525,08	-	-
INA04	N/A	Nível < 510,1	Nível ≥ 510,10	-	-
PZ02	N/A	Nível < 516,64	Nível ≥ 516,64	-	-
INA03	N/A	Nível < 511,26	Nível ≥ 511,26	-	-
PZ08	N/A	Nível < 515,46	Nível ≥ 515,46	-	-

Fonte: O autor (2024)

Tabela 6 – Níveis de controle de INA's e PZ's referentes ao Resultado 2

NOME DO INSTRUMENTO	95 PERCENTIL	NÍVEL NORMAL	NÍVEL DE ATENÇÃO n = 3	NÍVEL DE ALERTA n = 6	NÍVEL DE EMERGÊNCIA n = 12
PZ05	509,11	Nível < 510,12	510,12 ≤ Nível < 511,13	511,13 ≤ Nível < 513,15	Nível ≥ 513,15
PZ06	510,61	Nível < 512,27	512,27 ≤ Nível < 513,93	513,93 ≤ Nível < 517,25	Nível ≥ 517,25
PZ03	508,48	Nível < 508,77	508,77 ≤ Nível < 509,05	509,05 ≤ Nível < 509,62	Nível ≥ 509,62
PZ07	508,26	Nível < 508,55	508,55 ≤ Nível < 508,84	508,84 ≤ Nível < 509,41	Nível ≥ 509,41
INA06	508,24	Nível < 508,45	508,45 ≤ Nível < 508,65	508,65 ≤ Nível < 509,07	Nível ≥ 509,07
PZ04	508,47	Nível < 509,06	509,06 ≤ Nível < 509,65	509,65 ≤ Nível < 510,83	Nível ≥ 510,83
INA05	508,55	Nível < 508,87	-	-	Nível ≥ 508,87
INA02	N/A	Nível < 516,21	Nível ≥ 516,21	-	-
INA01	N/A	Nível < 511,91	Nível ≥ 511,91	-	-
PZ01	N/A	Nível < 525,08	Nível ≥ 525,08	-	-
INA04	N/A	Nível < 510,1	Nível ≥ 510,10	-	-
PZ02	N/A	Nível < 516,64	Nível ≥ 516,64	-	-
INA03	N/A	Nível < 511,26	Nível ≥ 511,26	-	-
PZ08	N/A	Nível < 515,46	Nível ≥ 515,46	-	-

Fonte: O autor (2024)

Tabela 7 – Níveis de controle de INA's e PZ's referentes ao Resultado 3

NOME DO INSTRUMENTO	95 PERCENTIL	NÍVEL NORMAL	NÍVEL DE ATENÇÃO n = 8	NÍVEL DE ALERTA n = 16	NÍVEL DE EMERGÊNCIA n = 32
PZ05	509,11	Nível < 510,73	510,73 ≤ Nível < 512,34	512,34 ≤ Nível < 515,57	Nível ≥ 515,57
PZ06	510,61	Nível < 513,27	513,27 ≤ Nível < 515,92	515,92 ≤ Nível < 521,24	Nível ≥ 521,24
PZ03	508,48	Nível < 508,94	508,94 ≤ Nível < 509,39	509,39 ≤ Nível < 510,3	Nível ≥ 510,30
PZ07	508,26	Nível < 508,72	508,72 ≤ Nível < 509,18	509,18 ≤ Nível < 510,11	Nível ≥ 510,11
INA06	508,24	Nível < 508,57	508,57 ≤ Nível < 508,9	508,9 ≤ Nível < 509,57	Nível ≥ 509,57
PZ04	508,47	Nível < 509,41	509,41 ≤ Nível < 510,36	510,36 ≤ Nível < 512,25	Nível ≥ 512,25
INA05	508,55	Nível < 509,07	-	-	Nível ≥ 509,07
INA02	N/A	Nível < 516,21	Nível ≥ 516,21	-	-
INA01	N/A	Nível < 511,91	Nível ≥ 511,91	-	-
PZ01	N/A	Nível < 525,08	Nível ≥ 525,08	-	-
INA04	N/A	Nível < 510,1	Nível ≥ 510,10	-	-
PZ02	N/A	Nível < 516,64	Nível ≥ 516,64	-	-
INA03	N/A	Nível < 511,26	Nível ≥ 511,26	-	-
PZ08	N/A	Nível < 515,46	Nível ≥ 515,46	-	

Fonte: O autor (2024)

4.5 Definição dos níveis de controle

Com a definição dos três resultados mais promissores, foi feito uma análise dos valores, que vai desde o entendimento da localização dos instrumentos até o valor proposto para cada resultado em questão. Da Tabela 8 a Os resultados observados no cenário 3 indicam que os critérios adotados para níveis de controle dos instrumentos são excessivamente permissivos, exigindo grandes variações nas leituras dos instrumentos para acionar níveis de controle. Essa abordagem pode atrasar significativamente a implementação de medidas corretivas, comprometendo a eficácia do monitoramento e da resposta às condições críticas. Em particular, os piezômetros PZ05 e PZ06, instalados próximos às ombreiras, tendem a apresentar maiores variações devido à influência de aquíferos no terreno natural, porém os valores atualmente registrados excedem significativamente as leituras históricas máximas desses instrumentos.

Considerando que as leituras dos instrumentos estão diretamente correlacionadas com os picos pluviométricos, o nível de atenção deve ser mais restritivo. Isso é essencial, visto que todos os instrumentos já apresentam leituras substancialmente superiores às registradas historicamente. Além disso, em dias de alta precipitação, o monitoramento deve ser reforçado para garantir a segurança da estrutura e evitar que ações corretivas sejam tomadas tarde demais, o que poderia comprometer tanto a integridade da estrutura quanto a mitigação de riscos associados.

A adoção de margens mais conservadoras nos níveis de controle é recomendada, especialmente considerando a variabilidade pluviométrica e o histórico de comportamento das leituras dos instrumentos. Isso permitiria um tempo de resposta adequado e eficiente, conforme preconizado por diretrizes de monitoramento geotécnico em estruturas.

Tabela 10 são apresentados as diferenças em metros entre os valores de nível de controle propostos por cada um dos resultados e suas respectivas leituras máximas. Destaca-se que os valores negativos significam que a leitura máxima estaria acima do nível referente a cada coluna.

Tabela 8 – Comparação entre os valores propostos pelo Resultado 1 e as leituras máximas dos instrumentos

Código do Instrumento	Leitura Máxima	Nível de atenção – Leitura Máxima	Nível de alerta – Leitura Máxima	Nível de emergência – Leitura Máxima
PZ05	509,27	0,04	0,24	0,65
INA06	508,41	-0,13	-0,09	-0,01
INA05	508,64	-	-	-0,03
PZ03	508,66	-0,12	-0,07	0,05
PZ04	508,58	0,01	0,13	0,36
PZ07	508,44	-0,13	-0,07	0,05
PZ06	510,83	0,11	0,44	1,11

Fonte: O Autor (2024)

O resultado 1 apresenta um nível de restrição elevado, e, ao analisar a tabela, verifica-se que os instrumentos INA06 e INA05 atingiriam o nível de emergência com base nas suas leituras históricas, enquanto os instrumentos PZ03 e PZ07 entrariam no nível de alerta. Considerando que a estrutura em questão, historicamente, não apresentou nenhuma anomalia física como, carreamento de materiais pelo filtro drenante ou a formação de trincas no maciço, esse resultado foi descartado. A proposta foi considerada excessivamente restritiva, podendo levar a decisões desnecessárias que não refletem o comportamento real da barragem, gerando alarmes indevidos e intervenções sem fundamento técnico robusto.

Tabela 9 – Comparação entre os valores propostos pelo Resultado 3 e as leituras máximas dos instrumentos

Código do Instrumento	Leitura Máxima	Nível de atenção – Leitura Máxima	Nível de alerta – Leitura Máxima	Nível de emergência – Leitura Máxima
PZ05	509,27	1,46	3,07	6,30
INA06	508,41	0,16	0,49	1,16
INA05	508,64	-	-	0,42
PZ03	508,66	0,28	0,73	1,64
PZ04	508,58	0,83	1,78	3,67
PZ07	508,44	0,28	0,74	1,66
PZ06	510,83	2,44	5,09	10,41

Fonte: O Autor (2024)

Os resultados observados no cenário 3 indicam que os critérios adotados para níveis de controle dos instrumentos são excessivamente permissivos, exigindo grandes variações nas leituras dos instrumentos para acionar níveis de controle. Essa abordagem pode atrasar significativamente a implementação de medidas corretivas, comprometendo a eficácia do monitoramento e da resposta às condições críticas. Em particular, os piezômetros PZ05 e PZ06, instalados próximos às ombreiras, tendem a apresentar maiores variações devido à influência de aquíferos no terreno natural, porém os valores atualmente registrados excedem significativamente as leituras históricas máximas desses instrumentos.

Considerando que as leituras dos instrumentos estão diretamente correlacionadas com os picos pluviométricos, o nível de atenção deve ser mais restritivo. Isso é essencial, visto que todos os instrumentos já apresentam leituras substancialmente superiores às registradas historicamente. Além disso, em dias de alta precipitação, o monitoramento deve ser reforçado para garantir a segurança da estrutura e evitar que ações corretivas sejam tomadas tarde demais, o que poderia comprometer tanto a integridade da estrutura quanto a mitigação de riscos associados.

A adoção de margens mais conservadoras nos níveis de controle é recomendada, especialmente considerando a variabilidade pluviométrica e o histórico de comportamento das leituras dos instrumentos. Isso permitiria um tempo de resposta adequado e eficiente, conforme preconizado por diretrizes de monitoramento geotécnico em estruturas.

Tabela 10 – Comparação entre os valores propostos pelo Resultado 2 e as leituras máximas dos instrumentos

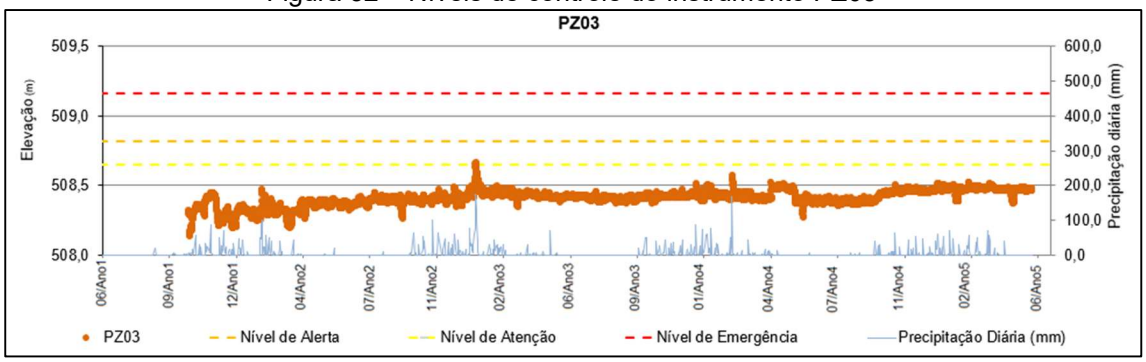
Código do Instrumento	Leitura Máxima	Nível de atenção – Leitura Máxima	Nível de alerta – Leitura Máxima	Nível de emergência – Leitura Máxima
PZ05	509,27	0,45	1,05	2,26
INA06	508,41	-0,05	0,08	0,33
INA05	508,64	-	-	0,10
PZ03	508,66	-0,01	0,16	0,50
PZ04	508,58	0,24	0,60	1,31
PZ07	508,44	-0,01	0,16	0,51

Código do Instrumento	Leitura Máxima	Nível de atenção – Leitura Máxima	Nível de alerta – Leitura Máxima	Nível de emergência – Leitura Máxima
PZ06	510,83	0,78	1,77	3,76

Fonte: O Autor (2024)

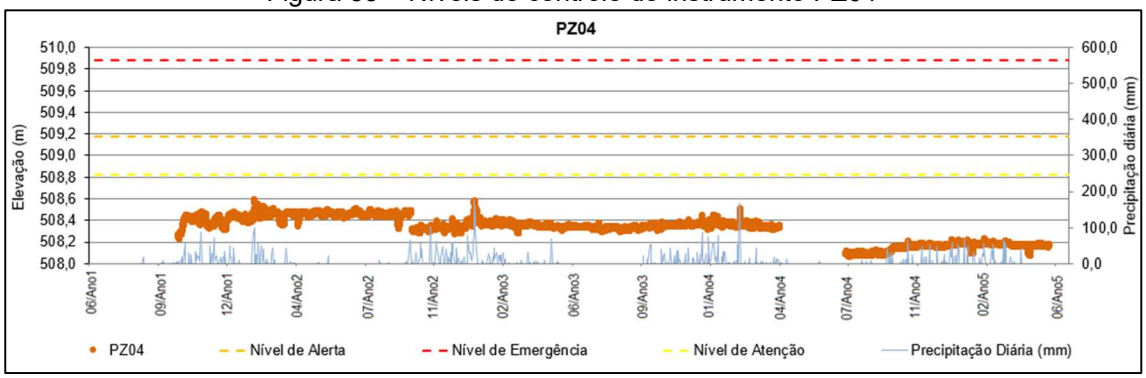
Após análise dos dados históricos dos instrumentos, o valor de "n" do resultado 2 considerado ideal foi estabelecido por se mostrar um ponto de equilíbrio entre restrição e liberalidade. Este valor não é excessivamente restritivo, o que poderia gerar alarmes desnecessários, nem liberal demais, o que poderia retardar a resposta a situações críticas. Entre a Figura 32 e Figura 38 é apresentado graficamente os valores dos níveis de controle para cada instrumento.

Figura 32 – Níveis de controle do instrumento PZ03



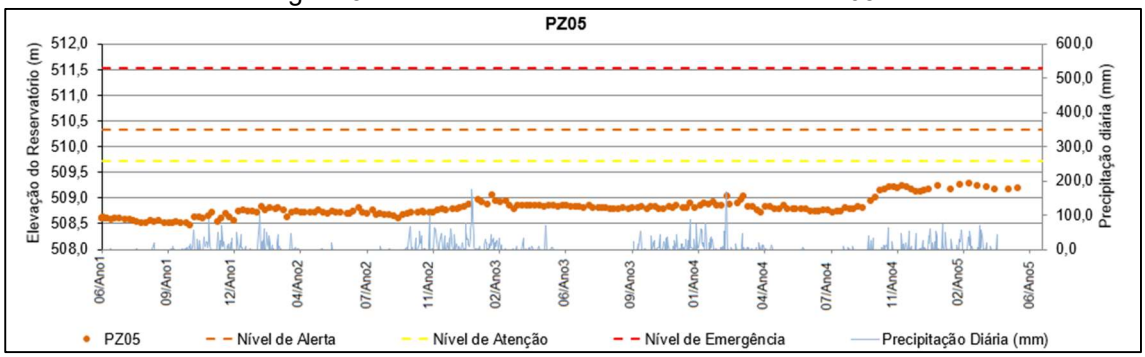
Fonte: O autor (2024)

Figura 33 – Níveis de controle do instrumento PZ04



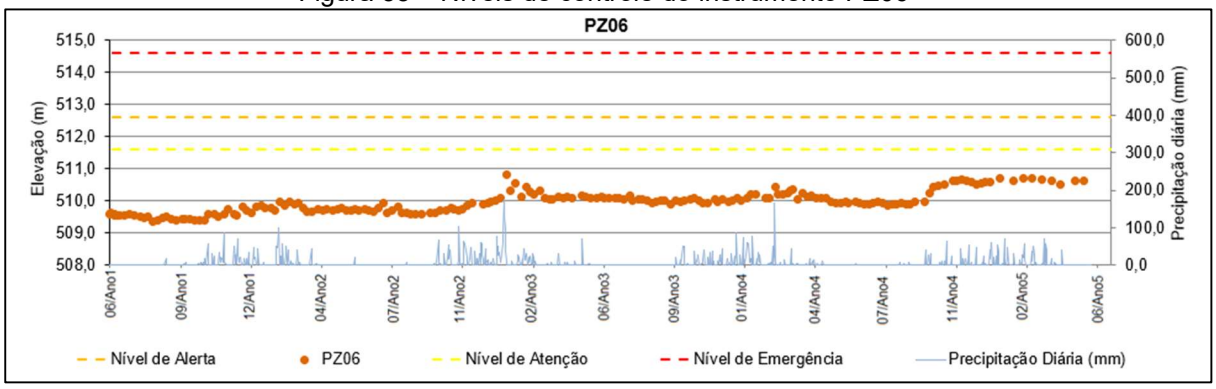
Fonte: O autor (2024)

Figura 34 – Níveis de controle do instrumento PZ05



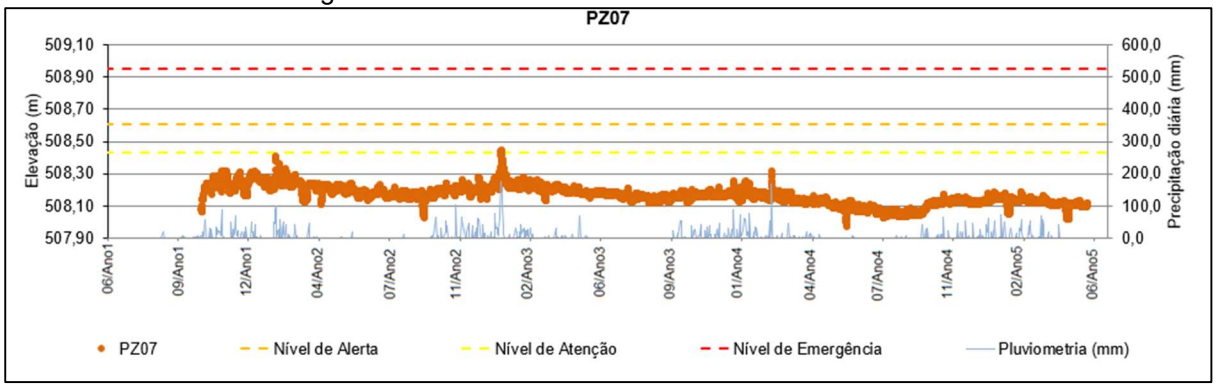
Fonte: O autor (2024)

Figura 35 – Níveis de controle do instrumento PZ06



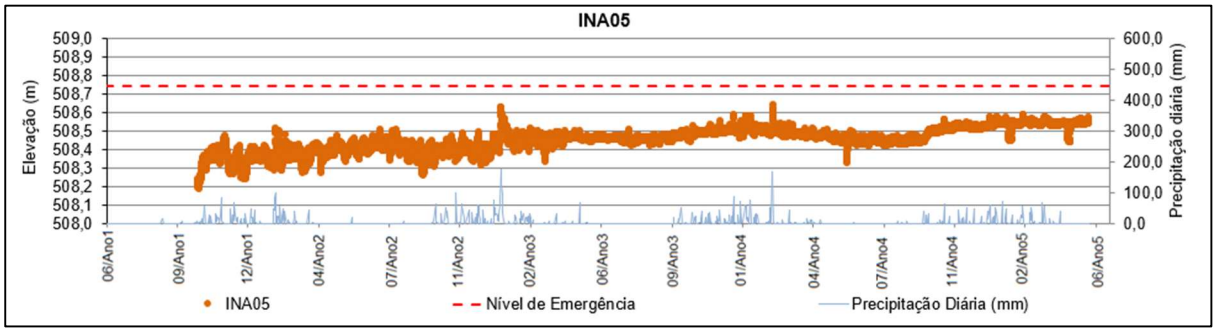
Fonte: O autor (2024)

Figura 36 – Níveis de controle do instrumento PZ07



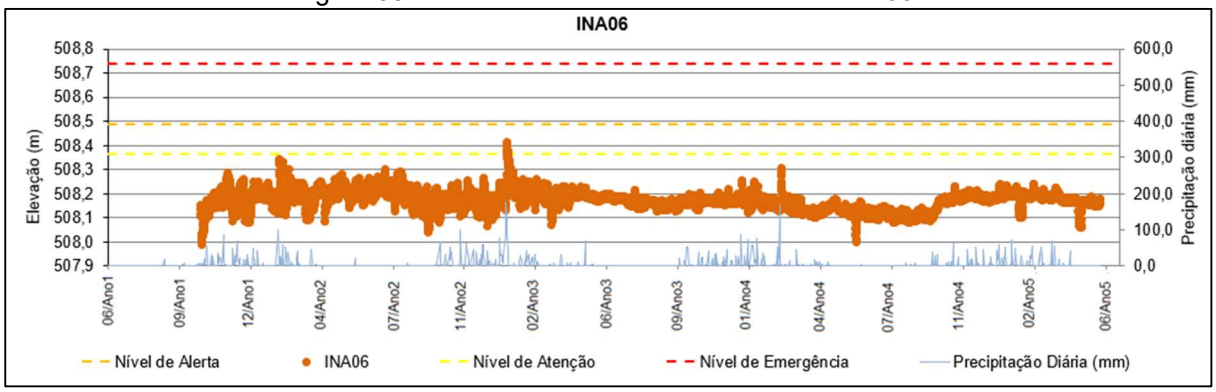
Fonte: O autor (2024)

Figura 37 – Níveis de controle do instrumento INA05



Fonte: O autor (2024)

Figura 38 – Níveis de controle do instrumento INA06



Fonte: O autor (2024)

Instrumentos como INA06, PZ03 e PZ07, que apresentaram menores desvios padrão, são mais estáveis e exibem valores de controle mais restritos. Como apresentado nos gráficos, em dias de pico pluviométrico, esses instrumentos atingiriam o nível de atenção, o que reflete um comportamento ideal. Tal resposta é coerente com a necessidade de monitoramento cuidadoso durante períodos de alta precipitação, sem ser excessivamente restritivo. A estrutura, historicamente, não apresentou anomalias físicas, como carreamento de materiais ou formação de fissuras, e as leituras máximas registradas pelos instrumentos coincidem com os eventos de precipitação mais intensos. Isso reforça que os níveis de controle estabelecidos permitem um acompanhamento eficiente e preciso, especialmente em momentos críticos, sem acionamentos desnecessários de emergências.

No entanto, a comparação com cenários mais conservadores, como o cenário 1, é importante. Nesse caso, os instrumentos poderiam entrar em nível de emergência, mesmo sem evidências históricas de problemas estruturais significativos. Esse excesso de conservadorismo, embora vise aumentar a segurança, pode gerar alarmes falsos, comprometendo a eficácia operacional do sistema de monitoramento. Assim, o resultado observado nesse cenário balanceia adequadamente a precisão do monitoramento com a necessidade de evitar alertas desnecessários, garantindo que qualquer aumento significativo nas leituras de piezômetros, como PZ03, PZ07 e INA06, seja tratado com a devida atenção.

Por outro lado, os piezômetros PZ05 e PZ06, instalados próximos às ombreiras e em solos de fundação que apresentam maior variação histórica, naturalmente exibem desvios padrão mais altos. Isso se deve às características hidrogeológicas locais e à influência de aquíferos próximos, o que leva a maiores flutuações nas leituras de poropressão. Apesar dessas variações mais amplas serem esperadas, é crucial que o sistema de monitoramento continue identificando qualquer mudança brusca de forma eficiente, permitindo uma resposta rápida quando necessário, sem gerar alarmes excessivos ou ineficazes.

Essa abordagem metodológica é adequada para complementação de outras metodologias de definição de níveis de segurança. Ao incorporar o comportamento histórico da instrumentação, ela oferece um entendimento mais profundo das tendências dos dados ao longo do tempo, auxiliando na identificação de situações que possam ter sido negligenciadas por critérios excessivamente liberais. Além disso, essa metodologia serve como uma referência comparativa, permitindo ajustes em

metodologias que, eventualmente, apresentem parâmetros liberais demais, ajudando a garantir uma gestão mais precisa e segura dos níveis de controle.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho propõe uma metodologia que leva em consideração as particularidades dos comportamentos históricos de cada instrumento monitorado, garantindo que os níveis de controle definidos sejam um reflexo fiel desses comportamentos. Dessa forma, a abordagem respeita as especificidades de cada estrutura e garante uma precisão na definição dos limites operacionais. Para que essa análise seja confiável, é fundamental contar com um banco de dados robusto e de alta qualidade, uma vez que a confiabilidade dos dados é essencial para sustentar qualquer decisão baseada nessa metodologia.

A metodologia proposta neste trabalho apresenta-se como uma abordagem complementar às práticas cotidianamente utilizadas. Essa metodologia visa aprimorar o monitoramento e a análise do comportamento histórico das leituras dos instrumentos, oferecendo uma opção a mais para a definição dos níveis de controle, sem substituir os métodos tradicionais, mas fortalecendo-os com uma análise mais detalhada e adaptada às especificidades de cada estrutura.

As inspeções de rotina também desempenham um papel crucial na complementação da metodologia de definição de níveis de controle proposta neste trabalho. Enquanto os níveis de controle fornecem uma análise quantitativa baseada no comportamento histórico dos instrumentos, as inspeções visuais e técnicas realizadas periodicamente garantem uma verificação qualitativa da integridade da estrutura. A combinação dessas duas abordagens é essencial para uma gestão eficaz da barragem, uma vez que as inspeções podem identificar sinais de deterioração ou anomalias que ainda não se manifestaram nas leituras instrumentais. Além disso, o monitoramento contínuo aliado às inspeções de campo proporciona uma visão holística da condição da barragem, possibilitando a identificação precoce de riscos potenciais e aumentando a confiabilidade das decisões operacionais. Dessa forma, o trabalho conjunto entre a análise de dados e as inspeções físicas garante um controle mais preciso e seguro da estrutura.

É importante ressaltar que os níveis de controle definidos por essa metodologia não possuem relação com os níveis previstos no Plano de Ação de Emergência para

Barragens de Mineração (PAEBM), uma vez que os resultados encontrados não possuem relação com o fator de segurança da estrutura. Dessa forma, deve ser elaborado, internamente, um fluxo de ações de resposta caso algum instrumento deixe de apresentar leituras no nível normal.

Como sugestões para futuras pesquisas e trabalhos sobre este tema, recomenda-se o estudo de novas metodologias estatísticas que podem refletir em resultados de níveis de controles ainda mais coerentes com o comportamento histórico dos instrumentos. O estudo continuo deste tema é de extrema importância para que a operação de barragens seja ainda mais controlada e restrita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO **- ANM.** Resolução n° 95/2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - **ANM**. Resolução n° 130/2023. Alterara a Resolução ANM nº 95/2022.

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

FUSARO, T.C. 2007. "Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau", Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica**, Universidade Federal de Ouro Preto,** Ouro Preto, MG.

PENNA, D., Marinaro, R., LOPES, M., e CARMO, A. 2017. **Carta de risco como ferramenta na gestão de segurança de barragens**. Belo Horizonte, pp. 1-15.

PENNA, D., ARAGÃO, G., e FUSARO, T. 2015. **Complementariedade entre o monitoramento e análises de risco na gestão da segurança de barragens**, Foz do Iguaçu, pp. 1-14.

ANTUNES-ROCHA, Maria Isabel; HUNZICKER, Adriane Cristina de Melo; FANTINEL, Lúcia Maria. O rompimento da barragem B1 da mina Córrego do Feijão e os desafios para a educação. **Cadernos de Educação de Jovens e Adultos**, 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*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, **Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto**, 2023.

GUIMARÃES, Paula de Moreira. *O rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão: controvérsias da política da informação sobre riscos e impactos associados às barragens de mineração*. 2022. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Arquitetura, **Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2022.

ICOLD. International Commission on Large Dams. Bulletin 32: **International Recommendations for the Design of Large Dams**. Paris: ICOLD, 1973.

JANSEN, Robert B. *Dams and Public Safety*. Denver: U.S. **Department of the Interior, Bureau of Reclamation**, 1983.

MACHADO, Celso Luiz. *Barragens de Terra e Enrocamento: Projeto e Desempenho*. **Oficina de Textos,** São Paulo. 2007.

MARIANO, J.; SILVA, P. ***Barragens de Terra e Enrocamento: Fundamentos e Estudos de Caso***. Rio de Janeiro: Editora Geotecnia, 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*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, **Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto**, 2022.

MARTINS, Alaine de Rezende; REIS, Álefe Naari Moreira de Oliveira; FERREIRA, Flávia Loislanne de Souza; DOLCE, Guilherme Rodrigues; MELO, Luana Oliveira de; OLIVEIRA, Lucas Marçal de; MELLO, Luiz Antônio Sales de; FREITAS, Pedro Magno Gonçalves de. *Limitações existentes para definição dos níveis de controle em barragens de terra e terra-enrocamento*. Belo Horizonte: **Centro Universitário de Belo Horizonte** (UniBH), 2023.

MASSAD, Faiçal. **Obras de terra: curso básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, [s/d].

MASSAD, Francisco**. *Barragens de Terra e Enrocamento: Aspectos de Projeto e Construção*. São Paulo:** Edgard Blücher, 2010.

MELLO, Luiz Augusto**. *Fundamentos de Geotecnia Aplicados ao Projeto de Barragens*. Rio de Janeiro:**
Editora Interciência, 1975.

OLIVEIRA, Thomaz Alvisi de; LOBATO, Rodrigo Batista; FELIPE, Miguel Fernandes. O rompimento da Barragem I da mina do Córrego do Feijão: alterações na paisagem da bacia hidrográfica do ribeirão Ferro-Carvão, município de Brumadinho, Minas Gerais - Brasil**. Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 31, n. esp. 1, 2021.

SANTOS, Laryssa Cortes. *Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, **Universidade Federal de Uberlândia,** Uberlândia, 2019.

SOUZA, Thainá Suzanne Alves. *Evolução histórica da legislação brasileira e do estado de Minas Gerais relacionado ao tema de disposição de rejeitos de mineração em barragens*. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Minas, **Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2019.

SOUZA, Thainá Suzanne Alves. *Evolução histórica da legislação brasileira e do estado de Minas Gerais relacionado ao tema de disposição de rejeitos de mineração em barragens*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Minas, **Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2019.

TAVARES, Vera Lúcia Silva. *Proposta de metodologia para índice de risco (IR) no distrito sede do município de Ouro Preto/MG: uma contribuição para a hierarquização das áreas de risco e as tomadas de decisões*. 2018. Dissertação (Mestrado em

Geotecnia) – Escola de Minas, **Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2018.
TERZAGHI, Karl. ***Theoretical Soil Mechanics***. New York: John Wiley & Sons, 1943.