DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/21

Análise Estatística para Definição de Níveis de Controle Piezométricos em Barragens de Rejeitos

Francisco Moreira Mindêllo
Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil, franciscomindello@gmail.com

Isabela das Graças Machado
Engenheira Geotécnica, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil, isabela.machado@bvp.eng.br

Rayala Lisboa Masensini
Engenheira Geotécnica, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil, rayala.lisboa@bvp.eng.br

Lucas Golçalves de Faria
Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil, lucas.faria@bvp.eng.br

Guilherme de Almeida Silva
Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil, guilherme.silva@bvp.eng.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma abordagem estatística para definição de níveis de controle piezométrico em uma barragem de rejeitos em condição de elevada criticidade (Nível 3 de Emergência), com foco na detecção preventiva de elevações da linha freática e das pressões neutras. Foram analisadas 1.059.382 leituras registradas entre janeiro de 2020 e junho de 2025, provenientes de piezômetros e medidores de nível d'água automatizados e manuais, após filtragem de registros inconsistentes. Os instrumentos foram organizados em quatro grupos com comportamento hidráulico semelhante, permitindo a aplicação de critérios específicos por agrupamento. A metodologia adotou estatísticas robustas baseadas no intervalo interquartil (IQR) para definir limites superiores de controle e níveis graduais de atenção e alerta, utilizando a máxima histórica como referência conservadora de emergência. Os resultados indicam boa aderência dos níveis propostos às respostas observadas, inclusive durante eventos pluviométricos extremos registrados em 2022 (195 mm em um único dia e 1.837,65 mm na estação chuvosa), distinguindo instrumentos com resposta rápida e aqueles com comportamento hidráulico mais amortecido, contribuindo para o monitoramento preventivo da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Instrumentação geotécnica, Piezometria, Cartas de controle, Intervalo interquartil, Barragens de rejeitos, Monitoramento estatístico.

ABSTRACT: This study presents a statistical approach for defining piezometric control levels in a tailings dam under high criticality conditions (Emergency Level 3), focusing on the early detection of groundwater level rise and pore pressure increases. A total of 1,059,382 readings recorded between January 2020 and June 2025 were analyzed, comprising data from piezometers and water level indicators after filtering inconsistent records. The instruments were organized into four groups with similar hydraulic behavior, allowing the application of group-specific criteria. The methodology employs robust statistical metrics based on the interquartile range (IQR) to define upper control limits and progressive attention and alert levels, while the historical maximum value is adopted as a conservative emergency threshold. The results show strong adherence between the proposed limits and the observed hydraulic responses, including extreme rainfall events recorded in 2022 (195 mm in a single day and 1,837.65 mm during the rainy season), distinguishing instruments with rapid response from those with slower hydraulic behavior and supporting preventive dam safety monitoring.

KEYWORDS: Tailings dams; Piezometric monitoring; Geotechnical instrumentation; Statistical control charts; Interquartile range; Dam safety monitoring.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento piezométrico constitui um dos principais instrumentos para a avaliação contínua das condições de percolação e das pressões neutras em barragens de rejeitos, uma vez que elevações persistentes da linha freática podem reduzir a segurança global da estrutura. Em contextos de alta criticidade, como estruturas classificadas em Nível 3 de Emergência, torna-se necessário adotar critérios de interpretação mais restritivos e rastreáveis, capazes de sinalizar precocemente desvios em relação ao comportamento histórico.

Apesar da ampla disponibilidade de dados provenientes de sistemas automatizados de aquisição, a definição de limiares operacionais ainda depende frequentemente de critérios não padronizados ou interpretações empíricas, resultando em limites pouco comparáveis entre instrumentos e dificultando a padronização de gatilhos de resposta. Nesse contexto, abordagens estatísticas robustas podem contribuir para estabelecer níveis de controle coerentes com a variabilidade natural das séries de monitoramento, preservando a interpretabilidade geotécnica e apoiando a tomada de decisão.

A legislação brasileira também estabelece diretrizes para o acompanhamento sistemático das condições de segurança das barragens. A Resolução ANM nº 95/2022 destaca a necessidade de utilização de níveis ou critérios de monitoramento capazes de auxiliar na identificação de alterações no comportamento da estrutura. Entretanto, a norma não estabelece metodologias específicas para o cálculo desses limites ou para a definição de faixas operacionais de controle, deixando essa etapa a cargo da interpretação técnica dos responsáveis pelo monitoramento.

Nesse contexto, este trabalho propõe a definição de níveis de controle piezométrico a partir da análise estatística de 1.059.382 leituras registradas entre janeiro de 2020 e junho de 2025, provenientes de piezômetros e medidores de nível d'água distribuídos ao longo da estrutura. Após o tratamento e filtragem dos dados, os instrumentos foram agrupados em quatro grupos conforme a semelhança de comportamento hidráulico, posição relativa na estrutura e características de aquisição das leituras. Os limites foram definidos com base no intervalo interquartil (IQR), complementados por níveis graduais de atenção e alerta e por um critério conservador de emergência associado à máxima leitura histórica.

Os resultados demonstram boa aderência dos níveis propostos às respostas observadas, inclusive durante eventos pluviométricos extremos registrados em 2022 (195 mm em um único dia e 1.837,65 mm acumulados na estação chuvosa), com destaque para os instrumentos dos Grupos 1 e 2, que concentram a maior quantidade de leituras automatizadas e apresentam comportamentos hidráulicos contrastantes: resposta rápida associada à recarga pluviométrica e resposta mais lenta e amortecida.

2 CONTEXTO E INSTRUMENTAÇÃO

O estudo foi desenvolvido a partir de dados de instrumentação geotécnica provenientes de uma barragem de rejeitos localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. A estrutura possui altura superior a 80 m e encontra-se classificada em Nível 3 de Emergência, condição que exige rigor no acompanhamento do comportamento hidráulico e estrutural.

O sistema de instrumentação analisado é composto por 26 piezômetros (24 automatizados e 2 manuais) e 29 medidores de nível d'água, sendo 15 automatizados e 14 manuais. Esses instrumentos encontram-se distribuídos em diferentes regiões da barragem, permitindo o acompanhamento do regime piezométrico em distintas zonas da estrutura.

Para a análise estatística foram consideradas 1.059.382 leituras registradas entre janeiro de 2020 e junho de 2025. Antes da aplicação das análises, foi realizado tratamento e filtragem dos dados com remoção de registros inconsistentes.

Após essa etapa, os instrumentos foram organizados em agrupamentos com comportamento hidráulico semelhante, considerando sua posição na estrutura e o histórico das leituras, permitindo a aplicação das técnicas estatísticas apresentadas nas seções seguintes.

3 METODOLOGIA ESTATÍSTICA

A definição dos níveis de controle piezométricos foi realizada a partir da análise estatística das séries históricas de leituras registradas entre janeiro de 2020 e junho de 2025. A abordagem baseia-se em técnicas de

controle estatístico aplicadas ao monitoramento de instrumentação geotécnica, com o objetivo de estabelecer limites operacionais compatíveis com o comportamento histórico da estrutura.

Inicialmente foi realizado um processo de tratamento e filtragem das séries de dados, com remoção de leituras associadas a intervenções externas, como manutenções e calibrações de sensores, bem como registros inconsistentes posicionados acima da cota de topo ou abaixo da cota de fundo dos instrumentos. Após essa etapa, as leituras foram organizadas em séries temporais contínuas, permitindo a análise do comportamento piezométrico ao longo do período de monitoramento.

Considerando a variabilidade espacial e hidráulica presente em barragens de rejeitos, instrumentos instalados em diferentes regiões da estrutura podem apresentar respostas piezométricas distintas, influenciadas por fatores como características geotécnicas locais, permeabilidade dos materiais e conectividade hidráulica (Dunnicliff, 1988; Fell et al., 2015). Dessa forma, os instrumentos foram inicialmente agrupados de acordo com padrões semelhantes de comportamento histórico, permitindo a análise estatística conjunta de instrumentos com respostas hidráulicas comparáveis.

A partir dessa análise foram definidos quatro grupos principais de instrumentos, os quais apresentam comportamentos distintos em relação à amplitude das leituras, sensibilidade a eventos pluviométricos e variabilidade temporal.

3.1 Método Estatístico Adotado

Para a definição dos níveis de controle foi empregado o método do intervalo interquartil (Interquartile Range – IQR), amplamente utilizado em análises estatísticas para identificação da faixa típica de variação dos dados e detecção de valores discrepantes (Tukey, 1977; Montgomery, 2019).

O intervalo interquartil é definido pela diferença entre o terceiro e o primeiro quartil da distribuição:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (1)$$

A partir desse intervalo, podem ser definidos limites estatísticos superior e inferior para a série de dados:

$$LS = Q_3 + 1.5 \times IQR \quad (2)$$

$$LI = Q_1 - 1.5 \times IQR \quad (3)$$

onde:

- Q_1 representa o primeiro quartil (25º percentil);
- Q_3 representa o terceiro quartil (75º percentil);
- LS corresponde ao limite superior estatístico;
- LI corresponde ao limite inferior estatístico.

Esses limites representam a faixa de variação estatisticamente consistente das observações. (Tukey, 1977).

No contexto do monitoramento de barragens, no entanto, o comportamento piezométrico apresenta assimetria operacional, uma vez que elevações da linha freática ou piezométrica representam condição potencialmente desfavorável à estabilidade da estrutura, enquanto reduções nas leituras normalmente não configuram condição de risco imediato.

Dessa forma, para fins de aplicação das cartas de controle piezométricas, foi considerado apenas o limite superior estatístico, sendo o limite inferior utilizado apenas como referência auxiliar na análise exploratória dos dados. Essa decisão metodológica permite concentrar a análise nos cenários que representam aumento anômalo das pressões neutras ou da linha freática, que constituem os principais indicadores de comportamento potencialmente crítico em barragens de rejeitos.

3.2 Agrupamento dos Instrumentos

Após o tratamento das séries históricas, os instrumentos foram classificados em quatro grupos, considerando:

- amplitude histórica das leituras;

- relação entre máximos observados e limites estatísticos;
- padrão de variabilidade temporal;
- posição relativa dos instrumentos na estrutura;
- sensibilidade a eventos pluviométricos.

Essa classificação permitiu reduzir a influência de variabilidades locais e aplicar os critérios estatísticos de forma mais representativa para cada conjunto de instrumentos.

3.2.1 Grupo 1 – Instrumentos com resposta piezométrica rápida

Esse grupo apresenta elevada variabilidade e resposta rápida aos eventos de recarga pluviométrica. Nesses instrumentos observa-se que o limite superior estatístico calculado pelo método interquartil é inferior à máxima leitura registrada na série histórica, indicando a ocorrência de eventos pontuais de elevação acima da faixa estatisticamente típica. Esse comportamento está associado a instrumentos instalados em regiões com maior conectividade hidráulica, nas quais as variações de pressão neutra são transmitidas rapidamente após eventos de precipitação.

Para os instrumentos desse grupo foram definidos quatro níveis de controle piezométrico: normal, atenção, alerta e emergência. O nível de atenção foi associado ao terceiro quartil da distribuição das leituras (Q_3), representando o limite superior do comportamento típico da série. O nível de alerta corresponde ao limite superior estatístico definido pelo método interquartil (Equação 2), enquanto o nível de emergência foi associado à máxima leitura histórica registrada para o instrumento.

Essa estrutura de níveis permite distinguir entre variações típicas do regime hidráulico, elevações estatisticamente atípicas das leituras e valores extremos previamente observados na série histórica.

3.2.2 Grupo 2 – Instrumentos com comportamento piezométrico gradual

O Grupo 2 é composto por instrumentos que apresentam comportamento piezométrico mais estável e gradual ao longo do tempo. Diferentemente do observado no Grupo 1, nesses instrumentos a máxima leitura histórica permanece inferior ao limite superior estatístico obtido pelo método interquartil. Esse comportamento está associado a instrumentos localizados em regiões da estrutura com menor permeabilidade ou maior confinamento hidráulico, nas quais as variações de pressão neutra são transmitidas de forma mais lenta.

As séries temporais desses instrumentos apresentam variações suaves e contínuas, frequentemente associadas ao regime sazonal de precipitação. Como consequência, observa-se menor dispersão das leituras e reduzida ocorrência de picos abruptos, permitindo a aplicação direta dos limites estatísticos definidos pelo método interquartil.

Para esses instrumentos foram definidos quatro níveis de controle piezométrico: normal, atenção, alerta e emergência. O nível de atenção foi associado ao terceiro quartil da distribuição das leituras (Q_3), representando o limite superior do comportamento típico da série. O nível de alerta foi definido como o valor médio entre o terceiro quartil e a máxima leitura histórica registrada para o instrumento, conforme apresentado na Equação (4).

$$\text{Alerta} = \frac{Q_3 + L_{(max)}}{2} \tag{4}$$

Esse critério estabelece um limite intermediário entre o comportamento estatisticamente recorrente e o valor extremo observado, permitindo antecipar possíveis alterações no regime hidráulico antes que a máxima histórica seja atingida. O nível de emergência foi definido como leituras iguais ou superiores à máxima histórica registrada para o instrumento, indicando condição excepcional em relação ao comportamento previamente observado. Considerando que o principal fator de atenção no monitoramento piezométrico está associado à elevação da linha freática e das pressões neutras, as cartas de controle foram estruturadas com foco na avaliação dos aumentos das leituras, sendo o limite inferior utilizado apenas como referência auxiliar na análise exploratória dos dados.

3.2.3 Grupo 3 – Instrumentos predominantemente secos

O Grupo 3 corresponde a instrumentos que permaneceram predominantemente secos ao longo da série histórica, apresentando apenas registros esporádicos de coluna d'água.

Nesse caso, a aplicação direta de métodos estatísticos baseados em quartis torna-se limitada, uma vez que a maior parte das observações corresponde a valores nulos ou próximos à cota de fundo do instrumento.

Para esses instrumentos foi adotado um critério simplificado, definindo-se como nível de atenção a presença de coluna d'água superior a aproximadamente 0,5 m acima da cota de fundo do instrumento, valor considerado suficiente para indicar alteração relevante no regime hidráulico local.

3.2.4 Grupo 4 – Instrumentos de leitura manual

O Grupo 4 é composto por instrumentos cujas leituras são realizadas manualmente em campanhas periódicas de campo, apresentando menor frequência de aquisição de dados quando comparados aos sensores automatizados. Como análises estatísticas dependem de séries extensas para caracterização confiável dos padrões de comportamento, os instrumentos automatizados foram priorizados na análise estatística e na definição das cartas de controle.

Esses instrumentos encontram-se predominantemente instalados em seções intermediárias da estrutura, enquanto as regiões consideradas mais críticas são monitoradas por sensores automatizados instalados em cotas semelhantes. Dessa forma, as leituras manuais exercem papel complementar na interpretação do comportamento hidráulico da barragem.

Considerando as limitações associadas à frequência e densidade das leituras, os níveis de controle foram definidos com base nos valores históricos observados. O nível normal corresponde às leituras inferiores ao nível de atenção. O nível de atenção foi associado à máxima leitura histórica registrada para o instrumento, enquanto o nível de alerta foi definido como leituras iguais ou superiores à máxima histórica acrescida de 0,5 m, adotado como margem adicional para identificação de possíveis desvios em relação ao comportamento previamente observado. Para este grupo não foi definido nível de emergência, sendo eventuais leituras elevadas avaliadas em conjunto com instrumentos automatizados instalados em seções críticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da metodologia permitiu avaliar o comportamento piezométrico dos instrumentos monitorados e verificar a aderência dos níveis de controle às condições hidráulicas observadas.

Destaca-se o período chuvoso de 2022, quando foram registrados 195 mm de precipitação em um único dia e 1.837,65 mm acumulados na estação chuvosa, representando um dos maiores carregamentos hidráulicos observados desde o início do monitoramento da estrutura.

Esses eventos permitiram avaliar o comportamento dos instrumentos sob condições hidráulicas extremas, sendo observadas diversas leituras máximas históricas associadas à recarga pluviométrica.

Nos itens a seguir são apresentados instrumentos representativos dos Grupos 1 e 2, permitindo avaliar de forma ilustrativa a relação entre precipitação, resposta piezométrica e os níveis de controle definidos pela metodologia estatística.

4.1 Comportamento piezométrico do Grupo 1

Os instrumentos classificados no Grupo 1 apresentam comportamento piezométrico caracterizado por resposta rápida e elevada variabilidade das leituras, refletindo diretamente os eventos de recarga pluviométrica.

De forma geral, esses instrumentos estão instalados em regiões da estrutura mais próximas ao dique de partida, frequentemente associados a materiais de fundação ou zonas com maior permeabilidade, bem como em áreas próximas aos sistemas internos de drenagem. Nessas condições, a elevada condutividade hidráulica favorece a rápida transmissão das variações de pressão neutra e nível freático, resultando em respostas piezométricas praticamente imediatas após eventos de precipitação.

Esse comportamento pode ser observado na Figura 1, que apresenta a série temporal do instrumento PZ-09, juntamente com os registros de precipitação e os níveis de controle definidos pela metodologia estatística.

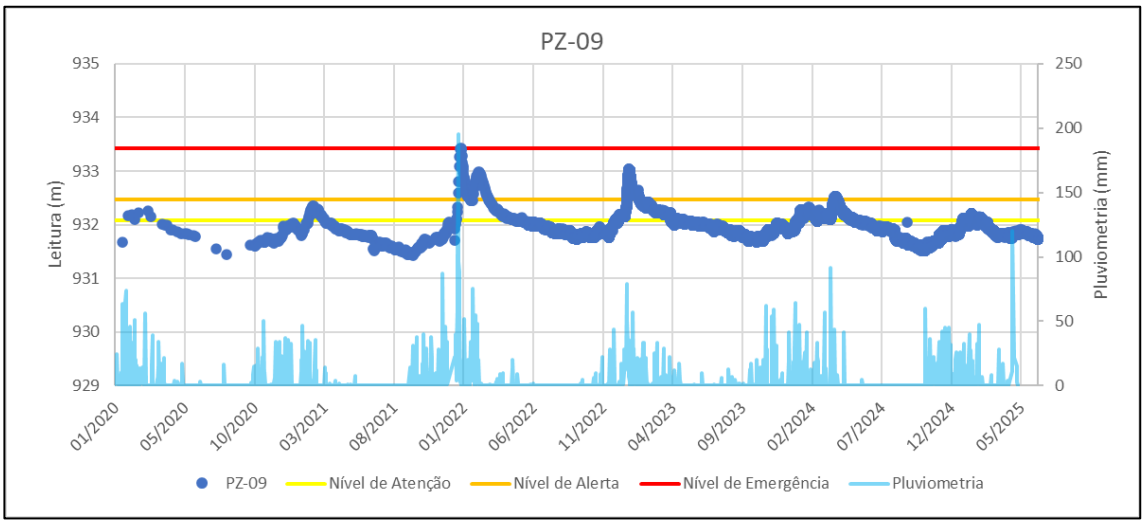


Figura 1. Série temporal de leituras piezométricas e precipitação para o instrumento representativo do Grupo 1.

Observa-se que os picos de leitura ocorrem com pequena defasagem temporal em relação aos eventos pluviométricos, indicando forte conectividade hidráulica entre a recarga superficial e os níveis monitorados. Após esses episódios, as leituras tendem a reduzir de forma relativamente rápida, evidenciando a atuação dos sistemas de drenagem e a eficiente dissipação das pressões neutras no maciço.

A interpretação dos níveis de controle definidos pela metodologia estatística permite compreender de forma progressiva esse comportamento. O nível de atenção, associado ao terceiro quartil da distribuição das leituras, corresponde à faixa em que os valores passam a se posicionar entre os maiores observados na série histórica. Já o nível de alerta, definido a partir do limite superior da zona de consistência estatística obtida pelo método do intervalo interquartil (IQR), corresponde a leituras que ultrapassam o padrão típico de dispersão dos dados. Nessas condições, embora os valores ainda permaneçam abaixo da máxima histórica, já indicam situações de maior carregamento hidráulico e demandam intensificação do acompanhamento e das inspeções de campo.

Para os instrumentos deste grupo, o limite superior estatístico obtido pelo método do intervalo interquartil apresentou-se inferior à máxima leitura registrada na série histórica, evidenciando a ocorrência de elevações pontuais acima da zona de consistência estatística, geralmente associadas a episódios de precipitação intensa. Nesse contexto, a adoção da máxima leitura histórica como nível de emergência mostrou-se coerente com o comportamento observado, funcionando como limite operacional conservador para identificar leituras que ultrapassem o regime hidráulico previamente registrado, especialmente durante períodos de elevada recarga hidráulica.

4.2 Comportamento piezométrico do Grupo 2

Os instrumentos classificados no Grupo 2 apresentam comportamento piezométrico distinto, caracterizado por resposta hidráulica mais lenta e amortecida em relação aos eventos de precipitação.

Esses instrumentos encontram-se predominantemente instalados em maiores profundidades no interior do maciço, monitorando regiões compostas majoritariamente por materiais de rejeito, os quais apresentam menor permeabilidade quando comparados aos materiais de fundação ou às zonas drenantes próximas ao dique de partida.

Nessas condições, a propagação das variações de pressão neutra ocorre de forma mais gradual. A Figura 2 apresenta a série histórica do instrumento PZ-13, representativo desse grupo.

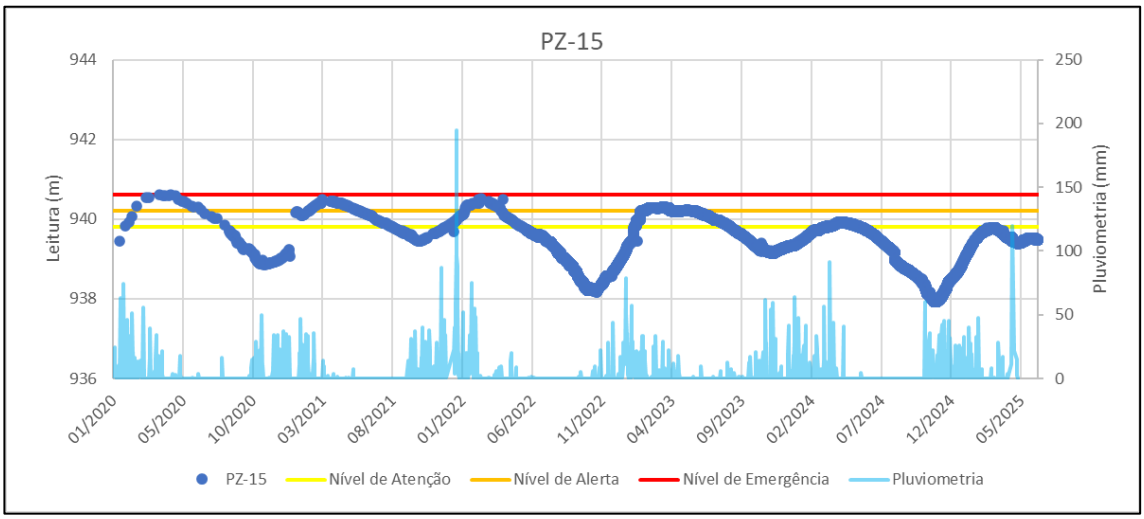


Figura 2. Série temporal de leituras piezométricas e precipitação para o instrumento representativo do Grupo 2.

Observa-se que as elevações piezométricas apresentam maior defasagem temporal em relação aos eventos pluviométricos, com tempo de resposta da ordem de alguns meses entre os picos de precipitação e os valores máximos de leitura. Esse comportamento reflete a dinâmica de infiltração e percolação da água através dos materiais menos permeáveis que compõem o interior do maciço. Como consequência, as séries temporais apresentam variações suaves e contínuas, frequentemente associadas aos ciclos anuais de precipitação, assumindo comportamento aproximadamente senoidal e evidenciando o caráter sazonal das variações piezométricas.

Mesmo apresentando comportamento mais estável, a definição dos níveis de controle permite identificar alterações graduais no regime hidráulico monitorado. O nível de atenção, associado ao terceiro quartil da distribuição das leituras, representa a faixa superior do comportamento típico observado na série histórica. Já o nível de alerta, definido como o valor médio entre o terceiro quartil e a máxima leitura histórica, estabelece um limite intermediário entre o comportamento estatisticamente recorrente e o valor extremo previamente observado, permitindo sinalizar situações em que as leituras passam a se aproximar de condições hidráulicas mais elevadas.

Diferentemente do observado no Grupo 1, a leitura máxima histórica registrada permanece inferior ao limite superior do intervalo interquartil (IQR), indicando que as observações permanecem dentro da zona de consistência estatística definida pela dispersão dos dados. Ainda assim, a máxima leitura histórica foi adotada como nível de emergência, considerando que a série histórica inclui eventos pluviométricos extremos já experimentados pela estrutura. Leituras superiores a esse patamar podem indicar alterações relevantes no regime hidráulico ou redução da eficiência dos sistemas de drenagem, demandando avaliação técnica imediata.

4.3 Avaliação da aderência da metodologia

A análise dos instrumentos representativos demonstra que os níveis de controle definidos apresentam boa aderência ao comportamento piezométrico observado. Nos instrumentos do Grupo 1, os limites estatísticos permitem identificar leituras associadas a eventos pluviométricos intensos e respostas hidráulicas rápidas. Já nos instrumentos do Grupo 2, os limites refletem o comportamento mais estável e gradual das leituras, permitindo identificar desvios relevantes em relação ao padrão histórico observado. A utilização de um banco de dados abrangendo mais de cinco anos de monitoramento contínuo, incluindo períodos de elevada precipitação, contribui para aumentar a confiabilidade dos limites definidos. Nesse contexto, a adoção da máxima leitura histórica como nível de emergência constitui um critério conservador, uma vez que representa o maior carregamento hidráulico previamente experimentado pela estrutura sob condições conhecidas de estabilidade.

Além disso, os níveis intermediários de atenção e alerta mostraram-se adequados para identificar elevações progressivas das leituras dentro de faixas estatisticamente superiores da distribuição dos dados. Esses limites permitem acompanhar a evolução do comportamento piezométrico de forma preventiva,

oferecendo suporte à tomada de decisão antes que sejam atingidas condições associadas ao nível de emergência.

De forma geral, os resultados indicam que a metodologia proposta permite estabelecer níveis de controle coerentes com o comportamento hidráulico da barragem, contribuindo para o monitoramento preventivo e para a identificação precoce de possíveis alterações no regime piezométrico.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este trabalho apresentou uma abordagem estatística para definição de níveis de controle piezométrico em barragens de rejeitos a partir da análise de séries históricas de monitoramento. A metodologia baseou-se na aplicação de estatísticas robustas da distribuição das leituras, associadas à interpretação geotécnica do comportamento hidráulico dos instrumentos.

A análise de mais de cinco anos de monitoramento permitiu identificar padrões distintos de resposta hidráulica entre os grupos de instrumentos. Sensores instalados em regiões próximas ao dique de partida e em materiais mais permeáveis apresentaram resposta rápida às variações pluviométricas, enquanto instrumentos instalados em maiores profundidades no interior do maciço apresentaram resposta mais lenta e amortecida, associada a processos graduais de infiltração e percolação.

Os níveis de controle definidos a partir do terceiro quartil, do limite superior do intervalo interquartil e da máxima leitura histórica mostraram-se coerentes com o comportamento hidráulico observado. Os níveis de atenção e alerta permitiram identificar elevações progressivas das leituras em faixas estatisticamente superiores da distribuição, funcionando como mecanismos de aviso prévio para o acompanhamento das pressões neutras.

Como perspectiva de evolução metodológica, destaca-se o potencial de integração entre abordagens estatísticas e técnicas de aprendizado de máquina aplicadas à análise de séries temporais de instrumentação geotécnica. Estudos recentes indicam que modelos preditivos podem auxiliar na estimativa do comportamento esperado de instrumentos de monitoramento e na identificação de padrões anômalos em sistemas complexos de monitoramento de barragens (Cheng & Zheng, 2013; Su et al., 2016; Zhang et al., 2019; Liu et al., 2020).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANM – Agência Nacional de Mineração (2022) Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Dispõe sobre a segurança de barragens de mineração e estabelece critérios para a elaboração e implementação do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). Diário Oficial da União, Brasília, Brasil.

Cheng, L.; Zheng, D. (2013) Two online dam safety monitoring models based on the process of extracting environmental effect. Advances in Engineering Software, 57, p. 48–56.

Dunnicliff, J. (1988) *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons, New York, USA.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., Foster, M. (2015) *Geotechnical Engineering of Dams*. CRC Press, London, UK.

Liu, Y.; Li, J.; Zhou, W. (2020) Prediction of dam deformation using machine learning techniques based on monitoring data. Engineering Geology, 275, 105742.

Montgomery, D.C. (2019) *Introduction to Statistical Quality Control*. 8th ed., John Wiley & Sons, New York, USA.

Su, H., Wen, Z., Wu, Z. (2016) Machine learning methods for dam monitoring data analysis: A review. *Automation in Construction*, 71, p. 23–31.

Tukey, J.W. (1977) *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, USA.

Zhang, L.; Wu, X.; Chen, Q. (2019) Dam monitoring data analysis methods: A literature review. Structural Control and Health Monitoring, 26(11), e2436.