

Análise Estatística Aplicada para Determinação de Níveis de Controle de Medidores de Vazão Instalados em Barragens de Mineração

Danilo Vítor dos Santos Mützenberg

MS.c Engenheiro Civil Geotécnico, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, danilo.mutz@gmail.com

Raísia Martins da Silva Gomes

MS.c Engenheira Civil Geotécnica, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, raislagomess@gmail.com

RESUMO: Desde a década de 1980, tem-se buscado definir valores-limite de instrumentação em barragens (ICOLD, 1989). Atualmente, essa busca tem se intensificado para barragens de mineração devido às exigências legais, tanto no âmbito estadual (FEAM, 2020) quanto no nacional (ANM, 2022). A popularização do tema tem trazido diversas metodologias para a definição desses valores-limite, permitindo a prevenção de eventuais modos de falha. Apesar da importância dos medidores de vazão para o acompanhamento dos sistemas de drenagem interna das barragens, observa-se uma escassez de pesquisas sobre a definição de níveis de controle para esses instrumentos. Neste trabalho, abordou-se a metodologia de estatística de Kuperman et al. (2003) para a determinação de níveis de controle para medidores de vazão em barragens de mineração. Foi apresentado um estudo de caso com cinco medidores de vazão em uma barragem de rejeito, evidenciando a análise e o tratamento dos dados da série histórica dos instrumentos para a definição de níveis de leituras consideradas normais ou anormais. Essa metodologia apresentou diversas vantagens, entre elas o aproveitamento das bases de leituras automatizadas para a realização de estudos estatísticos, além da facilidade de uso em comparação com métodos determinísticos.

PALAVRAS-CHAVE: Níveis de controle, Medidor de vazão, Barragens de mineração, Análise estatística, Estudo de Caso.

ABSTRACT: Since the 1980s, there has been a pursuit to define limit values for instrumentation in dams (ICOLD, 1989). Currently, this pursuit has intensified for mining dams due to legal requirements, both at the state level (FEAM, 2020) and nationally (ANM, 2022). The popularization of this topic has brought forth various methodologies for defining these limit values, allowing for the prevention of potential failure modes. Despite the importance of flow meters for monitoring the internal drainage systems of dams, there is a noticeable lack of research on defining control levels for these instruments. In this work, the statistical methodology of Kuperman et al. (2003) was addressed to determine control levels for flow meters in mining dams. A case study was presented on five flow meters of a tailings dam, highlighting the analysis and treatment of the historical data series from the instruments to define levels of readings considered normal or abnormal. This methodology presented several advantages, including the utilization of automated reading bases for conducting statistical studies, as well as the ease of use compared to deterministic methods.

KEYWORDS: Control levels, Instrumentation, Mining dams, Statistical analysis, Case study.

1 INTRODUÇÃO

É indiscutível a importância da instrumentação para o processo de acompanhamento e avaliação permanente do comportamento de barragens, fornecendo dados para avaliar se a estrutura apresenta comportamento conforme esperado e fornecer informações de mudança de condições que possam indicar risco à segurança da barragem. Segundo Fusaro (2007), para que a instrumentação assuma um papel importante na manutenção da segurança da estrutura, é imprescindível que a informação adequada seja coletada e

documentada, mas, acima de tudo, que seja analisada em tempo hábil. Uma medida de acelerar a análise desses dados, de forma a se ter uma resposta em tempo suficiente caso ocorra um evento atípico, é a adoção de níveis de controle para a instrumentação, servindo como níveis de referência para indicar condições normais ou anormais para a estrutura.

Desde a década de 80, existe uma busca por definição de valores limites de instrumentação em barragens (ICOLD, 1989) e atualmente isso tem sido intensificado para barragens de mineração por causa das exigências legais, tanto no âmbito estadual (FEAM, 2020) quanto nacionalmente (ANM, 2022).

Essa popularização no tema tem trazido diversas metodologias para a definição de valores-limite para a instrumentação dessas estruturas permitindo a prevenção de um eventual modo de falha. Vasconcellos Filho (2023) afirma que a determinação de níveis de controle pode ser apoiada em modelos estatísticos, modelos determinísticos ou tomando estas considerações conjuntamente, caracterizando assim os modelos híbridos.

Porém, observa-se que tais modelos são amplamente utilizados para a determinação de níveis para instrumentos como indicadores de nível d'água, piezômetros e até marcos superficiais, sendo notada uma escassez de pesquisas sobre definição de níveis de controle para medidores de vazão.

Considerando a importância dos medidores de vazão (MVs) para o monitoramento dos sistemas de drenagem interna, por meio da verificação da vazão de água percolada nas barragens, com o objetivo de prever ocorrências de *piping* ou a elevação do nível d'água no maciço devido à colmatação dos drenos, este artigo apresenta um exemplo de aplicação de uma metodologia estatística para a definição de níveis de controle para esse tipo de instrumento. Um estudo de caso é utilizado para exemplificar o processo de tratamento dos dados e a definição dos níveis.

Esta metodologia apresentou diversas vantagens, entre elas o aproveitamento de bases de dados robustas possibilitadas pela automatização dos instrumentos analisados, permitindo a realização de estudos estatísticos. Além disso, destaca-se a facilidade de uso em comparação com métodos determinísticos, que exigem ensaios para conhecer as propriedades físicas e mecânicas dos materiais da estrutura, além do uso de *softwares* específicos para a realização das análises.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características gerais do estudo de caso

Para o estudo da metodologia de definição de níveis de controle para medidores de vazão por métodos estatísticos, foi escolhida uma barragem atualmente em operação e com acompanhamento de seu comportamento por instrumentação, possibilitando a obtenção de uma base de dados robusta para as análises.

A barragem que compõe o estudo de caso deste artigo tem como principal função a disposição de rejeitos de lama e ultrafinos. A estrutura é composta por seções mistas, nas quais o maciço central possui um dique inicial de solo argiloso compactado, seguido por alteamentos de rejeito compactado. As ombreiras são compostas por aterros de solo argiloso compactado e aterros de enrocamento. A disposição do rejeito ocorre a partir da crista da estrutura, formando uma praia em toda a extensão do maciço central e das ombreiras. Para garantir a estabilidade e o funcionamento adequado da barragem, foram implementadas diversas medidas de drenagem interna. Isso inclui um dreno de fundo e um dreno de enrocamento de pé no maciço central, além de tapetes drenantes sanduíche entre os alteamentos. Nas ombreiras, foram instalados tapetes drenantes e filtros verticais de areia.

O monitoramento contínuo do comportamento hidráulico da barragem é essencial para mitigar riscos e garantir sua segurança. Nesse contexto, existem 05 (cinco) medidores de vazão principais instalados na estrutura analisada nesse artigo, sendo dois de leitura manual e três de leitura automatizada, que monitoram as saídas dos drenos centrais e das ombreiras. Para os instrumentos de leituras automatizadas, o registro de vazão ocorre duas vezes ao dia.

Ademais, como parte do processo de gestão de riscos da estrutura, foi desenvolvida uma carta de controle para a instrumentação da barragem, que inclui os medidores de vazão. Essa medida está em conformidade com as normas federais e estaduais (ANM, 2022; FEAM, 2023) e as boas práticas da engenharia, permitindo um acompanhamento eficaz do desempenho da barragem e a execução de medidas preventivas quando necessário.

2.2 Metodologia

Diante das escassas referências de metodologias encontradas para a determinação de níveis de controle para medidores de vazão, principalmente quando esses são instrumentos instalados para o acompanhamento de surgências, foram testados dois métodos para a definição dos referidos níveis.

Inicialmente, foi testada a metodologia apresentada por Fusaro (2007), a qual consiste na busca de correlações entre a leitura do instrumento e variáveis explicativas da variação das leituras. Como exemplo pode-se citar o nível d'água do reservatório e a leitura de um piezômetro. Encontrada essa correlação, são determinadas zonas de consistência e zonas de inconsistência de leituras de acordo com a variável explicativa, determinando assim os níveis de controle.

Porém, ao aplicar essa metodologia nos medidores de vazão da barragem em questão, não foi possível identificar variáveis explicativas claras que determinassem a variação da leitura dos instrumentos. A Tabela 1 apresenta os valores de R^2 da correlação encontrada entre as leituras dos medidores de vazão e o nível do reservatório.

Tabela 1. R^2 das correlações entre as leituras dos instrumentos e o nível do reservatório.

Instrumento	MV-01	MV-03	MV-04	MV-05	MV-06
R^2	0,37	0,14	0,28	0,024	0,93

Fusaro (2007) recomenda em seu trabalho que correlações com coeficientes menores que 0,70 sejam descartadas, pois tais correlações explicam apenas cerca de 50% das variações observadas nas leituras. Pelos dados da Tabela 1, é possível observar que os valores de R^2 são baixos, em que cerca de 83% das correlações testadas não atingiram um coeficiente de 0,70. Assim, conclui-se que tal metodologia não seria a mais adequada para a determinação dos níveis de controle para os instrumentos.

Entende-se que a correlação encontrada para o medidor de vazão MV-06 diferiu-se dos outros medidores por causa de sua posição na estrutura. Enquanto os outros medidores são posicionados no pé das regiões da praia da estrutura, sendo locados longe do reservatório e assim tendo menor influência da variação do nível do reservatório e mais do ciclo de disposição de rejeito, o MV-06 é posicionado na ombreira esquerda, região sem praia, longe da região de deposição do rejeito, e com barramento de menor tamanho. Com isso, o caminho de percolação entre o reservatório e esse medidor é menor, resultando em uma maior influência do nível do reservatório nas leituras do medidor de vazão.

Diante desses fatos, a metodologia trazida por Fusaro (2007) não se adequou completamente ao caso e, portanto, foi utilizada a metodologia trazida por Kuperman *et al.* (2003), na qual também são definidos limites de leituras com base em valores chamados de “Valores Referência Superior e Inferior”, sendo esses obtidos por meio de análises estatísticas das médias e desvio padrão para a série histórica de leituras.

O princípio da análise estatística utilizada nesta carta de controle para os medidores de vazão tem como objetivo a identificação de leituras padrão na série temporal de dados observados na estrutura, de forma a se determinar o que seria a situação de funcionamento normal do instrumento e leituras que saem desse padrão de normalidade.

Primeiramente, realizou-se o tratamento dos dados, identificando e desconsiderando os *outliers*, valores que se diferenciam estatisticamente de todos os outros valores da população e que podem causar anomalias nas análises estatísticas.

Para a definição dos níveis de controle foi utilizada a Regra Empírica, com a qual foi possível estimar a proporção de uma distribuição normal que pode ser encontrada dentre de 1, 2 ou 3 desvios padrão da média. De acordo com essa regra, se a população de um conjunto de dados segue uma distribuição normal, tem-se que 68% dos dados estão posicionados dentro de um desvio padrão da média, 95% dentro de dois desvios padrão da média e 99,7% dos dados dentro de três desvios padrão da média, como mostrado na Figura 1.

A partir disso, foi considerado que, após o tratamento, os dados da instrumentação desta estrutura dentro do intervalo de média ± 3 desvios padrão podem ser considerados normais e os dados fora desse intervalo são considerados em níveis fora do intervalo normal de operação. A partir disso, definiu-se os níveis de controle (atenção, alerta e emergência) estabelecendo intervalos em razão dos desvios padrão dos valores dos instrumentos.

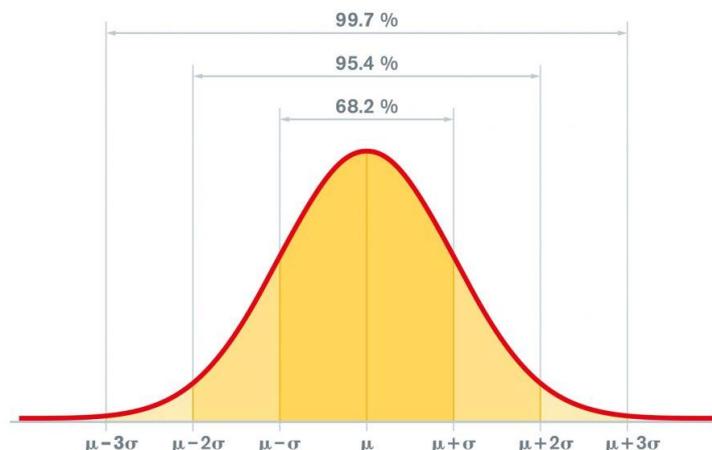


Figura 1. Representação da regra empírica (Datascience, 2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise do histórico de leituras do medidor de vazão, foram considerados os dados históricos disponibilizados pela Mineradora. Como a estrutura passou por obra de alteamentos e adequação geométrica, alguns períodos de leitura não são mais representativos do estado atual da estrutura. A partir disso, foram considerados dados do medidor de vazão a partir do ano de 2020.

O tratamento inicial foi feito por meio de uma análise de *boxplot*, onde foram considerados *outliers* os dados fora dos limites inferior e superior, como mostrado na Figura 2. Além dos *outliers*, foram também verificados pontos consecutivos com uma diferença muito grande de leitura, sendo analisadas as fichas de inspeção com possíveis explicações para tais diferenças. Os pontos em que não foram encontradas evidências que explicassem as diferenças das leituras consecutivas foram desconsiderados.

Como pode ser visto na Figura 2, a análise das leituras históricas apresenta uma quantidade maior de *outliers*, corroborando para o fato de que muitas leituras já não são representativas. Apesar dos últimos 3 anos também apresentarem *outliers*, esses são em menores quantidades, podendo representar apenas erros de leituras pontuais.

Após o tratamento dos dados, foi observado o padrão comportamental das leituras ao longo do ano, de forma a se determinar um comportamento considerado normal para o instrumento e leituras anormais, sendo estimado que, após o tratamento, o intervalo de 99,7% de dados normais e 0,3% de dados anormais seria adequado para os instrumentos estudados.

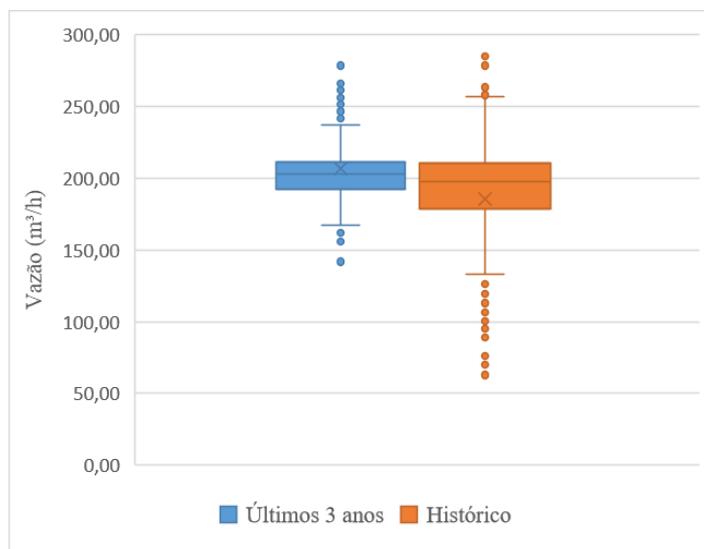


Figura 2. BoxPlot das leituras históricas e dos últimos 3 anos.

Com os dados tratados, foram calculados parâmetros estatísticos descritivos, obtendo as médias, medianas e desvios padrão de cada instrumento e, a partir desses parâmetros estatísticos descritivos, foram definidos os intervalos de níveis de controle. O intervalo de normalidade foi definido até o limite de média mais 3 desvios padrão e a partir desse limite, os níveis consecutivos foram definidos somando um desvio padrão. Portanto, a definição dos níveis de controle dos medidores de vazão seguiu as seguintes premissas:

- Normal/Atenção: média \pm 3 * desvio padrão;
- Atenção/Alerta: média \pm 4 * desvio padrão
- Alerta/Emergência: média \pm 5 * desvio padrão

Observa-se na Figura 3 os dados históricos tratados e os intervalos de níveis de controle determinados pela metodologia de Kuperman *et al.* (2003), sendo clara a determinação das leituras normais e, na ocasião do MV-03, a leitura no nível de atenção.

A Figura 3 apresenta os dados históricos tratados e os intervalos de níveis de controle determinados pela metodologia de metodologia de Kuperman et al. (2003) para o MV-03, sendo clara a presença de grande parte das leituras em níveis normais e poucas leituras no nível de atenção. Para os medidores MV-04, MV-05 e MV-06, seguiu-se a mesma metodologia como visto nas Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

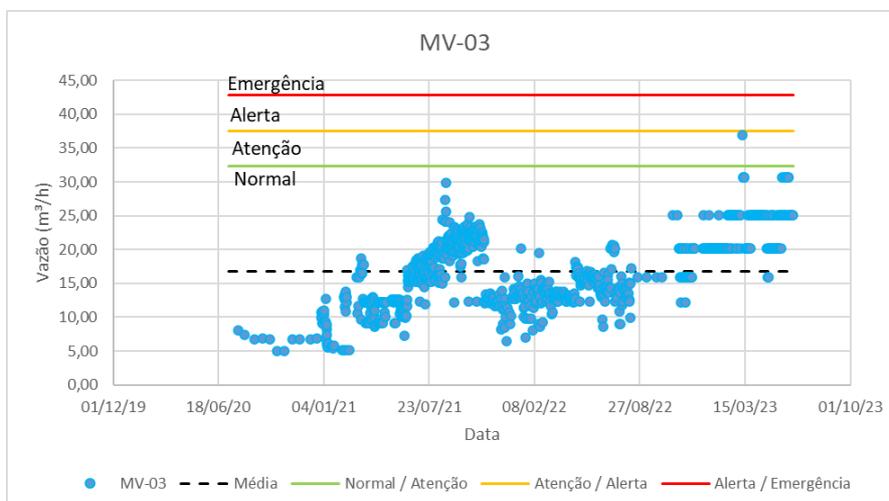


Figura 3. Série histórica e níveis de controle do medidor do dique de ombreira MV-03.

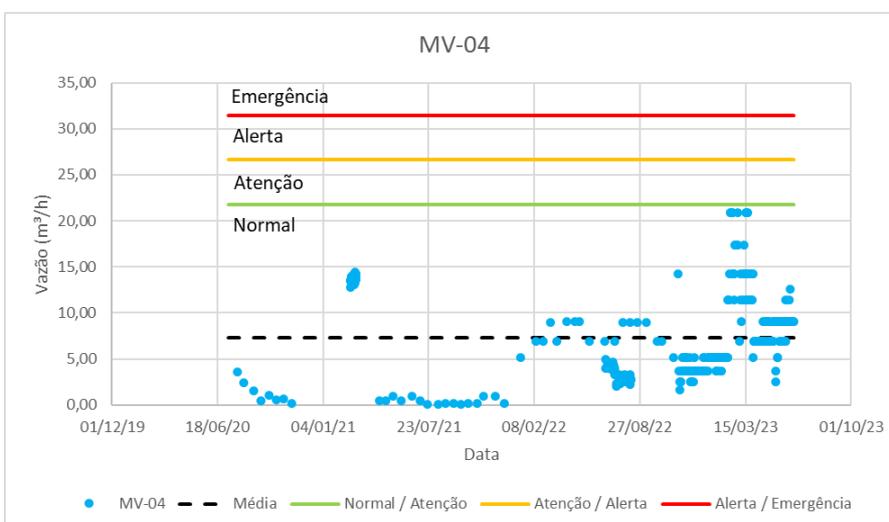


Figura 4. Série histórica e níveis de controle do medidor do dique de ombreira MV-04.

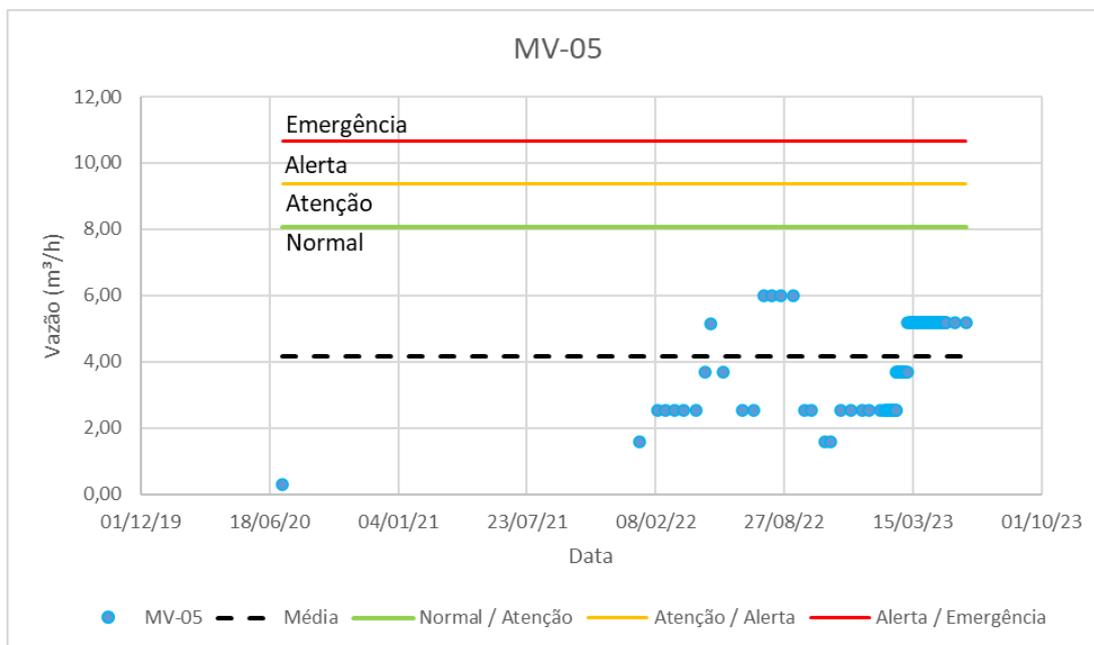


Figura 5. Série histórica e níveis de controle do medidor do dique de ombreira MV-05.

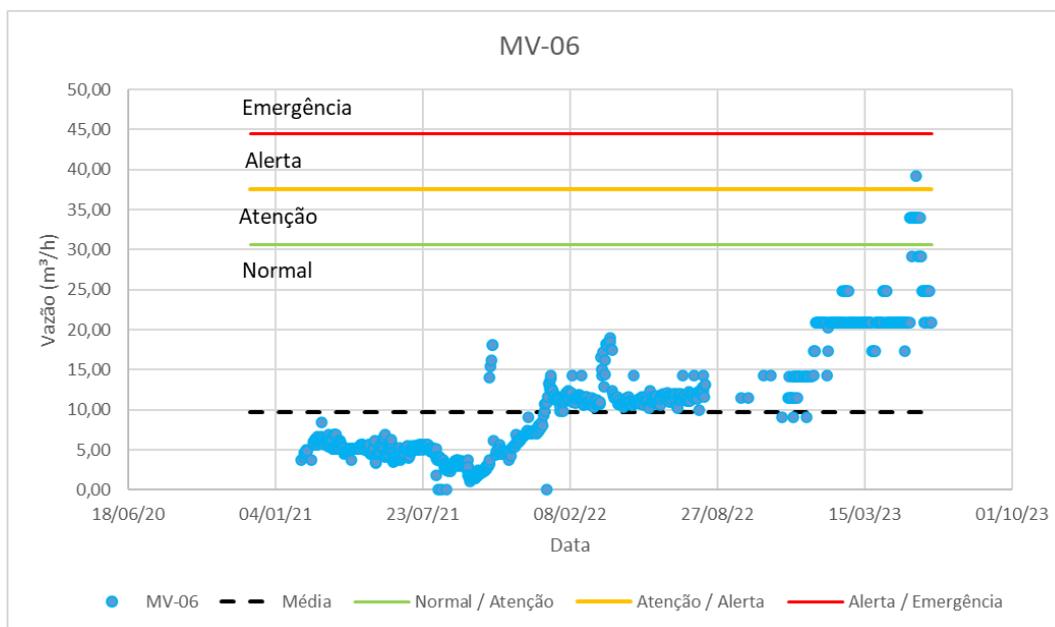


Figura 6. Série histórica e níveis de controle do medidor do dique de ombreira MV-06.

Para o medidor de vazão do dreno de pé, além dos limites superiores, definiu-se também os limites inferiores, como mostrado na Figura 7. Essa determinação dos limites inferiores foi possível uma vez que os valores elevados de vazão possibilitaram subtrair os desvios padrão da média mantendo valores ainda possíveis de serem lidos no instrumento, fato que não foi possível realizar nos outros medidores.

A avaliação de possíveis reduções de vazão do dreno principal da estrutura é importante, pois pode representar uma possível colmatção do sistema de drenagem interna ou a aparição de um fluxo preferencial para outra região caso essa redução não seja resultante de uma diminuição do nível do reservatório.

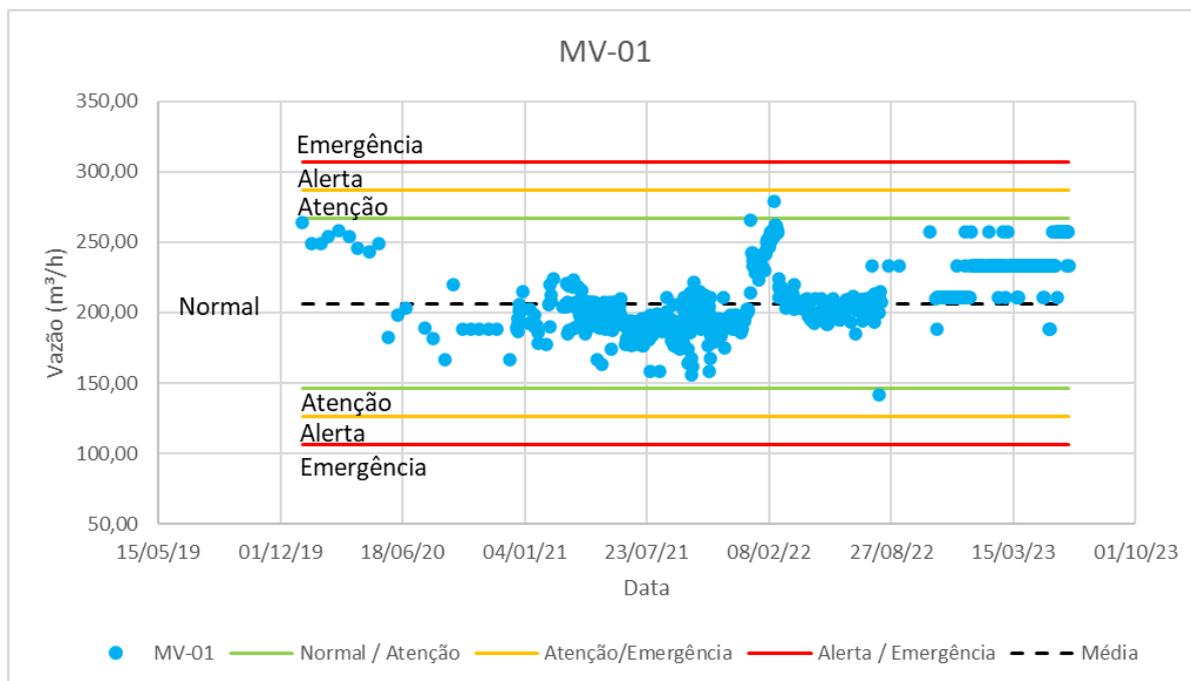


Figura 7. Série histórica e níveis de controle do medidor da saída da drenagem interna MV-01

Nota-se que, devido à premissa da metodologia de considerar 99,7% dos dados como normais, existirão necessariamente dados na série que serão classificados fora do nível normal, entrando em pelo menos no nível de atenção, a depender da distância do seu valor em relação à média. Portanto, recomenda-se avaliar durante a aplicação dessa metodologia se realmente existem leituras que representem estados anormais.

Ademais, o limite de normalidade definido pela média mais 3 desvios representa os 99,7% dos dados normais de acordo com a Regra Empírica, tendo um sentido estatístico claro. Porém ao somar mais desvios, o sentido estatístico se perde, a não ser que se tenha uma base de dados onde porcentagens muito pequenas dos dados ainda sejam significativas. Contudo, de forma a simplificar a metodologia, escolheu-se continuar com a lógica de adição de desvios padrão para a definição dos níveis de controle subsequentes ao normal e, no caso estudado, os níveis ainda tiveram sentido físico, servindo de referência para tomada de medidas de controle.

4 CONCLUSÕES

O estudo de caso desta estrutura possibilitou exemplificar o emprego de duas metodologias estatísticas para a determinação de níveis de controle para os 5 medidores de vazão em uma barragem de mineração. A metodologia proposta por Fusaro (2007) não apresentou concordância estatística para a barragem estudada e, por isso foi desconsiderada para definição dos níveis de controle. Para a metodologia de Kuperman et al. (2003), foi demonstrado o processo de tratamento dos dados e definição dos níveis de controle.

Esta metodologia apresentou diversas vantagens, dentre elas o aproveitamento das bases de dados robustos possibilitadas pela automatização dos instrumentos para a realização de estudos estatísticos, além da facilidade de seu uso em comparação com métodos determinísticos, que precisam de ensaios para o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos materiais da estrutura, além de *softwares* específicos para a realização das análises.

Porém, para utilizar esta metodologia, é necessário ter um nível de confiabilidade nas leituras dos instrumentos, além de uma quantidade suficiente para se realizar as análises estatísticas dos dados. Uma análise com poucos dados pode não ser representativa do comportamento da estrutura, levando a níveis de controle inadequados.

Estruturas com modificações constantes, como alteamentos consecutivos, também podem não se enquadrar na metodologia, uma vez que as leituras anteriores dos instrumentos não representam mais o seu estado atual ou futuro.

Por fim, é importante ressaltar que mesmo com as definições dos níveis de controle para os instrumentos e o acompanhamento das leituras desses, a evolução das leituras deve ser criticamente analisada, a fim de

avaliar o funcionamento do sistema de drenagem interna da barragem por outros mecanismos, como é o caso do acompanhamento da qualidade da água provida desse dispositivo, bem como observar principalmente se existe ou não carreamento de finos nas bacias dos medidores, de forma a aferir adequadamente a condição desses sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANM (2022). Resolução nº 95. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>>. Acesso em: 19/03/2024.
- Barreto, M. P. (2023). Análise de vazões de percolação de 133 barragens de terra e enrocamento e definição de valores de controle para medidores de vazão. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 206p.
- de Vasconcellos Filho, T. M., Rachid, M. A., Martins, M. N. C., Nunes, E. S., & Fusaro, T. C. (2023). Discussão sobre valores de controle para a instrumentação de barragens. XXXIV Seminário Nacional De Grandes Barragens, Foz Do Iguaçu, PR, 20p.
- FEAM (2023) Termo De Referência Para A Elaboração Do Relatório Técnico De Auditoria De Segurança De Barragens. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/2023/GESTAO_BARRAGENS/novos/Termo_de_refer%C3%A2ncia_para_Relat%C3%B3rio_de_T%C3%A9cnico_de_Auditoria_de_Seguran%C3%A7a_de_Barragens_V3-2023.pdf. Acesso em: 29/06/2024.
- Fusaro, T.C. (2007). Estabelecimento de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 369p.
- ICOLD (1989). *Bulletin 68. "Monitoring of Dams and their Foundations"*.
- Kuperman, S.C., Cifu, S., Moretti, M.R., Re, G., Pírfari, J.C., Carneiro, E.F., Rossetto, S.L.G., e Reigada, R.P. (2003). Reavaliação da Instrumentação de Auscultação Instalada em Barragens da CESP. In XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Salvador, pp. 116-133.
- Marinaro, R. A. (2022) Proposta de metodologia para definição dos níveis de controle da instrumentação associados aos modos de falha: estudo de caso em uma barragem para disposição de rejeito de mineração. Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica. 159P.
- Velten, R. Z., Santos, R.D.N., Elian, L.H., Ribeiro, L.L., E Dias, M.A.L. (2016). Proposição de Metodologia para a Elaboração de Carta de Risco de Barragens de Terra e Terra-Enrocamento. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte.
- Datascience (2024). Calculadora de Regra Empírica. Disponível em: <https://datascience.eu/pt/matematica-e-estatistica/calculadora-de-regra-empirica/#google_vignette>. Acesso em 10/04/2024