XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.2/13

Estatística Aplicada à Integração de Monitoramento Automatizado e Inspeção Geotécnica em Barragens

João Antônio Teixeira Soares
Engenheiro Geotécnico, Tellus Company Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, jats.joao@gmail.com

Germano Silva de Araújo
Diretor, Tellus Company Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, garaujo@telluscompany.com.br

Gerson da Rocha Izidoro
Gerente de Geotecnia de Barragens, CBMM, Araxpa, Brasil, gerson.izidoro@cbmm.com

Marcos Antônio Lemos Júnior
Gerente Sênior de Meio Ambiente e Barragens, CBMM, Araxá, Brasil, marcos.lemos@cbmm.com

Jonatas de Souza Ferreira
Analista de Geoprocessamento, CBMM, Araxá, Brasil, jonatas.ferreira@cbmm.com

RESUMO: O monitoramento de deslocamentos superficiais é um elemento essencial na gestão da segurança de barragens e de grandes estruturas geotécnicas, pois permite a identificação precoce de comportamentos atípicos e a avaliação contínua da performance da estrutura. Este trabalho apresenta uma metodologia estatística aplicada à análise de deslocamentos horizontais e verticais medidos por marcos superficiais lidos por estação total robótica, fundamentada na avaliação do comportamento histórico da instrumentação. A metodologia foi aplicada a um conjunto de dados coletados entre janeiro de 2022 e março de 2025, abrangendo deslocamentos nas direções norte, leste e vertical (recalques). A abordagem adotada baseia-se na utilização de estatísticas descritivas e robustas, com destaque para o desvio padrão em diferentes escalas temporais (diária, mensal e anual) e para a mediana, analisada em janelas móveis de 15 dias. Adicionalmente, foram desenvolvidos modelos de regressão linear para investigar a relação entre a variabilidade das leituras e a distância dos instrumentos em relação à estação total de referência, bem como aplicado o teste de normalidade de Anderson-Darling para avaliação da distribuição dos dados. Com base nos resultados obtidos, foram definidos níveis de controle estatísticos associados a múltiplos da mediana, sendo adotado o critério de cinco vezes o desvio padrão global como limite de referência para a identificação de deslocamentos atípicos. A análise dos resultados demonstrou que a maior parte das leituras se mantém dentro do comportamento histórico esperado, não sendo observadas tendências progressivas ou aceleradas que indiquem condições de instabilidade. Conclui-se que a metodologia proposta constitui uma ferramenta objetiva, consistente e tecnicamente fundamentada para subsidiar a interpretação de dados de monitoramento geotécnico, devendo ser aplicada de forma integrada a inspeções de campo e análises multidisciplinares no contexto da segurança de barragens.

PALAVRAS-CHAVE: monitoramento geotécnico; marcos superficiais; estação total robótica; estatística aplicada; segurança de barragens.

ABSTRACT: Surface displacement monitoring is an essential component of dam safety management and of large geotechnical structures, as it enables the early identification of atypical behavior and the continuous assessment of structural performance. This paper presents a statistical methodology applied to the analysis of horizontal and vertical displacements measured by surface benchmarks surveyed using a robotic total station, based on the evaluation of the historical behavior of the instrumentation. The methodology was applied to a dataset collected between January 2022 and March 2025, comprising displacements in the north, east, and vertical directions (settlements). The adopted approach relies on the use of descriptive and robust statistics, with emphasis on the standard deviation at different temporal scales (daily, monthly, and annual)

and on the median, analyzed using 15-day moving windows. In addition, linear regression models were developed to investigate the relationship between measurement variability and the distance of the instruments from the reference total station, and the Anderson–Darling normality test was applied to assess the data distribution. Based on the obtained results, statistical control levels associated with multiples of the median were defined, adopting the criterion of five times the median as a reference threshold for the identification of atypical displacements. The results demonstrate that most measurements remain within the expected historical behavior, with no evidence of progressive or accelerating trends indicative of instability conditions. It is concluded that the proposed methodology constitutes an objective, consistent, and technically sound tool to support the interpretation of geotechnical monitoring data and should be applied in an integrated manner with field inspections and multidisciplinary analyses within the context of dam safety.

KEYWORDS: geotechnical monitoring, marks, robotic total stations, statistical applied, safety of dams

1. INTRODUÇÃO

O acompanhamento sistemático do comportamento deformacional de estruturas geotécnicas é fundamental para a identificação precoce de anomalias e para a mitigação de riscos associados à sua operação. Em barragens, os deslocamentos superficiais fornecem informações relevantes sobre possíveis processos de instabilidade, recalques ou translações do maciço. Entretanto, a interpretação isolada de leituras individuais pode conduzir a conclusões equivocadas, uma vez que medições estão sujeitas a ruídos instrumentais, efeitos ambientais e eventos operacionais. Nesse contexto, abordagens estatísticas baseadas no histórico de monitoramento permitem caracterizar o comportamento típico da estrutura e definir critérios objetivos para a identificação de desvios significativos. O presente trabalho tem como objetivo apresentar e discutir uma metodologia estatística para definição de níveis de controle integrados à rotina de inspeção visual da estrutura.

Segundo Clarckson (2020), os processos de monitoramento automatizado, ou em tempo real, aprimoram as análises técnicas de barragens, principalmente em função da redução do tempo de coleta de dados e do ganho de agilidade na avaliação técnica. Neste sentido, os recursos da estatística descritiva se mostram como ferramenta robusta para atestar a qualidade da base de dados e permitir o estabelecimento de níveis de controles baseado no hitórico de dados. Importante reforçar que o recurso estátistico não sobrepõe o julgamento de engenharia, tampouco exime a necessidade de avaliar toda a instrumentação sob a perspectiva da análise geotécnica.

Engenheiros geotécnicos trabalham constantemente com incertezas. De modo geral, esses profissionais não podem controlar os materiais com os quais trabalham, uma vez que a natureza os formou por meio de processos aleatórios, resultando em condições não uniformes e altamente variáveis (Marr, 2013). Azeez (2025) realiza uma comparação de dados de inspeção visual aos resultados apresentados pelo monitoramento de deslocamento superficial via InSAR em barragem, Kang (2017) propôs metodologia para aprimorar a confiabilidade das Estações Totais baseada em calibração estatística. Este cenário corrobora para a importância de comparar métodos, retroanalisar a base de dados e estabelecer uma rotina operacional baseada na performance das estruturas.

O processo de inspeção visual tem um caráter rotineiro em que se deve atentar para o risco em que a equipe envolvida no processo se acostume com o cenário visual da estrutura e acabe não percebendo pequenas mudanças ou anomalias em estágio inicial de materialização. Portanto, o controle operacional estatístico proposto no estudo propõe a rápida identificação dos marcos superficias que apresentaram mudanças significativas no período entre as inspeções realizadas.

2. METODOLOGIA

A base de dados utilizada neste estudo refere-se ao monitoramento de uma barragem de aterro compactado, alteada a jusante, com aproximadamente 90 m de altura, cerca de 1.000 m de extensão de crista e uma área de aproximdamente 160.000 m² de área inspecionada. O sistema de instrumentação é composto por 69 marcos superficiais distribuídos ao longo da barragem, com espaçamento médio de aproximadamente 50 m, permitindo a avaliação contínua do comportamento deformacional da estrutura. As leituras dos marcos

são realizadas por meio de uma Estação Total Robótica, operando em regime automatizado, instalada na ombreira esquerda da estrutura, com frequência de aquisição de dados a cada 30 minutos e utiliza três marcos de referência estáveis para controle geométrico. Adicionalmente, o programa de monitoramento contempla inspeções visuais sistemáticas na barragem, realizadas em periodicidade quinzenal (a cada 14 dias), cujas observações são utilizadas de forma integrada às análises estatísticas dos dados instrumentais, reforçando a interpretação do comportamento estrutural e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para o controle dos deslocamentos superficiais é proposta uma metodologia de controle com base no histórico registrado para cada instrumento e o deslocamento acumulado diário registrado. As análises foram desenvolvidas com base nos dados disponibilizados entre os dias 01/01/2022 e 09/03/2025.

Os valores de referência apresentados têm como objetivo caracterizar o comportamento típico da estrutura com base no histórico de monitoramento. Para essa finalidade, são adotados dois indicadores estatísticos complementares: (i) o desvio-padrão das medições, calculado em bases diária, mensal e anual, utilizado para avaliar a dispersão dos dados; e (ii) a variação da mediana em intervalos de 15 dias, empregada para identificar possíveis alterações na tendência central das observações ao longo do tempo. Adicionalmente, é ajustado um modelo de regressão linear para avaliar a relação entre o desvio-padrão e a distância. Posteriormente, a distribuição dos dados é submetida ao teste de normalidade de Anderson-Darling, considerando nível de significância de 5%, por meio do software Minitab Statistical Software 22. Com base nesses procedimentos estatísticos, são estabelecidos critérios para a distinção entre registros compatíveis com o comportamento esperado da estrutura e registros potencialmente atípicos, os quais demandam análise específica.

No monitoramento, avaliam-se os deslocamentos da estrutura em dois sentidos: no eixo vertical e no eixo horizontal, investigando eventuais translações na estrutura. Os tópicos a seguir apresentam as análises realizadas, bem como os níveis estatísticos para o deslocamento vertical.

3. ESTATÍSTICA E ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS

3.2 Desvio Padrão e Comportamento Histórico

Para a análise dos deslocamentos verticais, foram utilizados os registros de leitura obtidos entre os dias 01/01/2022 e 09/03/2025. Avaliou-se o desvio padrão diário, mensal e anual para todos os instrumentos.

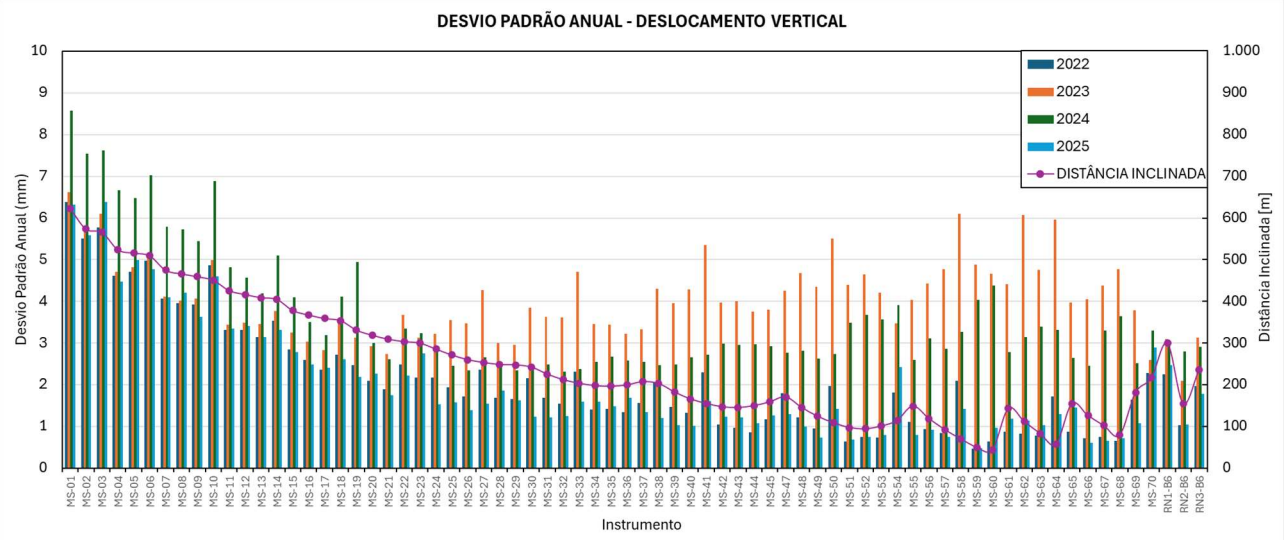


Figura 1 - Desvio padrão em função da distância.

Observa-se um desvio padrão variando entre, aproximadamente 8,0 mm e 3,0 mm em orden decrescente em relação à distância entre o marco superficial e a ETR. É esperada a redução do desvio padrão

em função da redução da distância, baseado no funcionmento dos equipamentos de geomensura, que possuem margem de erro magioritariamente atreladas a distância do monitoramento e condições climáticas.

A Figura 1 também demonstra que o ano de 2023 apresenta o maior desvio padrão. Este comportamento foi observado em função da realização de uma obra de engenharia próximo aos marcos de referência da ETR. Importante reforçar que o aumento no desvio padrão não afetou qualidade do monitoramento, uma vez que este é composto por outras tecnologias e rotinas de avaliação geotécnica que atestaram a segurança da estrutura e a qualidade do monitoramento durante o período.

Considerando a média do desvio padrão durante todo o período avaliado e a distância de cada instrumento em relação à ETR, foi realizada uma análise estatística de regressão utilizando o programa Minitab Statistical Software 22, conforme apresentado na Figura 2.

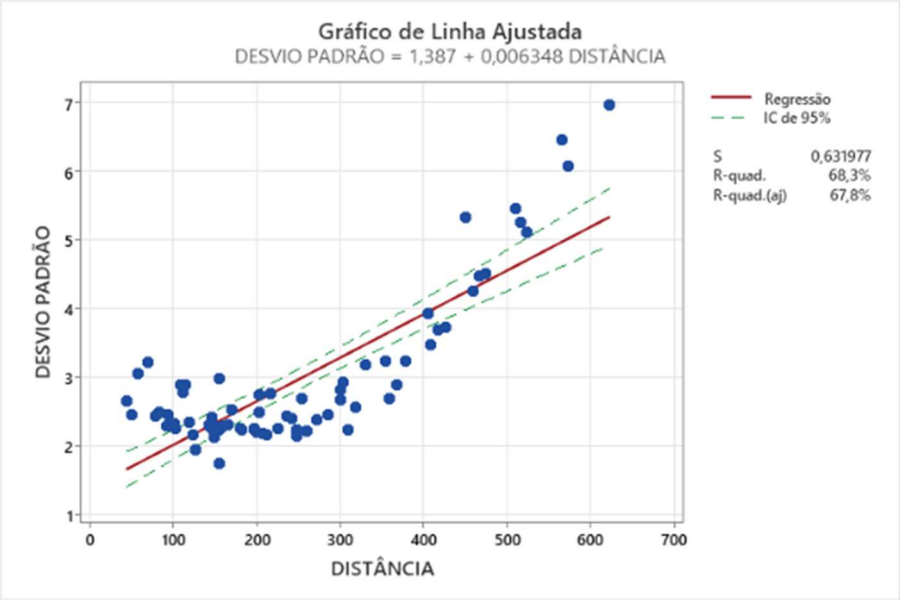


Figura 2 - Regressão linear - Desvio Padrão e Distância.

É observado um fator R^2 de 68,3% e um S de 0,632 mm para o deslocamento vertical. Do ponto de vista estatístico, o resultado indica um ajuste ineficiente da regressão linear, porém, baseado no julgamento de engenharia, decidiu-se manter o modelo e avaliar o seu comportamento a partir da perspectiva geotécnica. É observado que existem dois comportamentos distintos na relação entre desvio padrão e distância. Esta mudança de comportamento ocorre a partir dos 300 metros de distância entre os marcos supericiais e a ETR. A Figura 3 ilustra um mapa de calor que relaciona o gradiente de cor em função da distância inclinada entre o marco superficial e a ETR. É possível observar que a zona central da barragem demonstrada pela região em amarelo claro e verde claro são as que apresentam um desvio padrão entre 2,0 mm e 3,0 mm, corroborando com o gráfico apresentado na Figura 2.

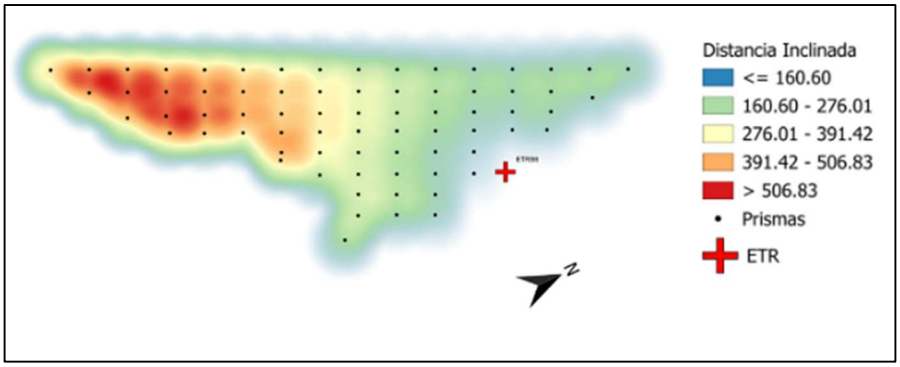


Figura 3 - Mapa de calor em relação à distânca inclinada.

Quanto aos marcos superficiais com distancia superior a 300 m, estão concentrados na região da ombreira direita da estrutura, local em que não são esperados recalques significativos.

3.2 Teste de Normalidade e Desvio Padrão Global

Foi realizado o teste de normalidade Anderson-Darling utilizando o Minitab Statistical Software 22. Esse teste é uma análise estatística que verifica se o conjunto de dados segue uma distribuição normal. Os resultados obtidos para a direção vertical estão apresentados na Figura 4.

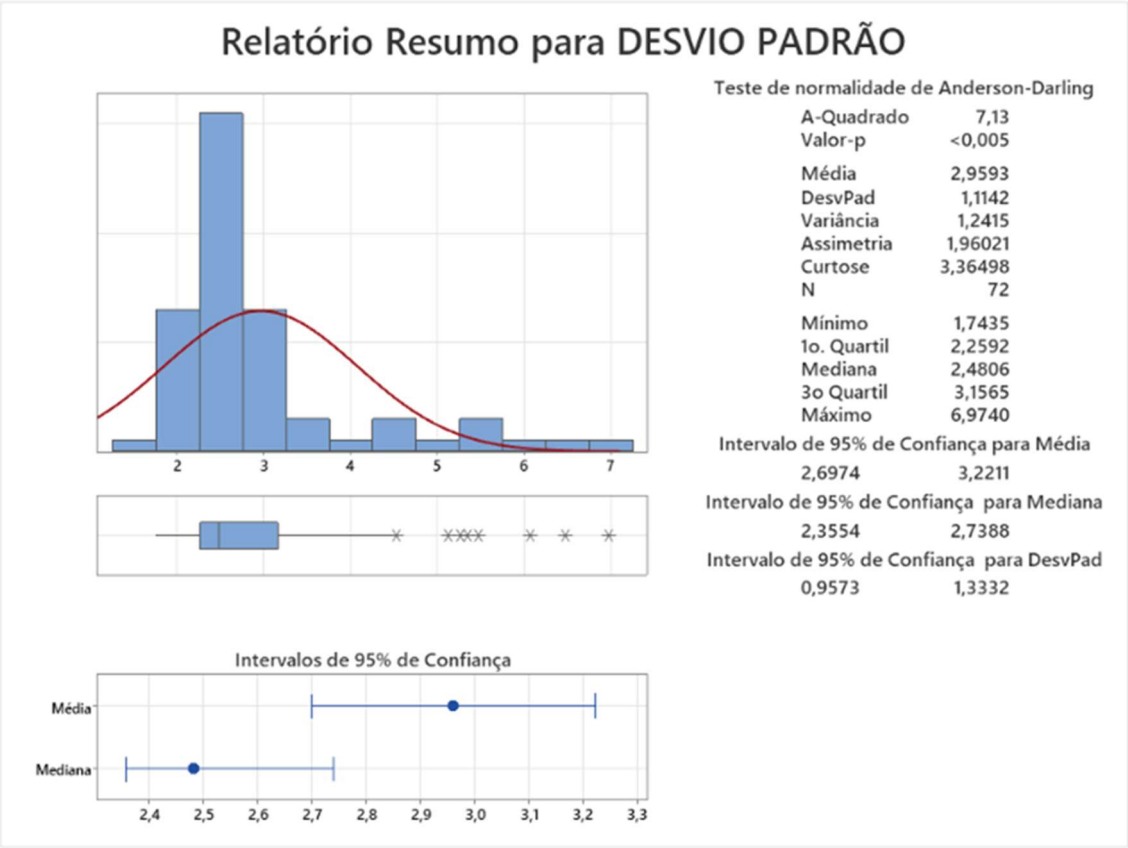


Figura 4 - Teste de Normalidade - Anderson Darling.

O teste de Anderson-Darling apresentou um valor-p < 0,005 para a direção vertical, indicando que poucos dados se encontram fora do padrão de comportamento dos demais. Além disso, observa-se que a mediana apresenta um intervalo de confiança consistente. Portanto, para a definição dos níveis de controle dos marcos superficiais, optou-se por utilizar a mediana como referência. A mediana representa um valor de 2,48 mm que será arredondado para 2,50 mm para utilização no estabelecimento do nível de controle, doravante denominado como Desvio Padrão Global (DPG).

O valor de mediana encontrado pode ser observado nos instrumentos com distância de até aproximadamente 300,0 m conforme a Figura 2, que é justamente a zona mais susceptível a recalques, por ser as regiões de maiores alturas de aterro da estrutura.

A identificação dos outliers foi realizada por meio da análise gráfica dos boxplots e do critério da amplitude interquartil (IQR). Considerando os quartis observados (Q1 = 2,26 mm e Q3 = 3,16 mm), o limite superior para identificação de valores atípicos foi estimado em aproximadamente 4,5 mm. Verificou-se que tais registros correspondem predominantemente a marcos superficiais localizados em regiões de ombreira, onde não são esperados recalques significativos em função das menores alturas de aterro. Assim, por não representarem o comportamento predominante da população de dados utilizada para a definição dos níveis de

controle, sua exclusão foi considerada adequada e consistente com o julgamento de engenharia adotado no estudo.

4. NÍVEL DE CONTROLE ESTATÍSTICO

Segundo Clarckson (2021), a engenharia geotécnica está inserida em um contexto multidisciplinar no qual o monitoramento de barragens é centralizado em uma rotina integrada, sendo o principal desafio identificar e utilizar a capacidade dos sistemas de monitoramento para compreender o desempenho e o comportamento complexos das barragens, com foco na capacidade de previsão de seu comportamento em relação aos seus modos de falha.

4.2 Fundamento do Nível de Controle

O objetivo principal do nível de controle proposto no estudo é de permitir uma inspeção baseada em dados de monitoramento, no que se refere à avaliação de eventuais recalques na estrutura. Será estabelecido um múltiplo do desvio padrão global encontrado no Item 3 como nível de controle a ser verificado anteriormente à inspeção. O marco superficial que indicar o atingimento de nível de controle deverá ser inspecionado com maior rigor, pois entende-se que há uma mudança de comportamento em sua região e esta está propensa ao surgimento de anomalias, tais como: trincas, abatimentos, empoçamentos d'água, etc.

É importante reforçar que o processo de inspeção visual em si não se altera, ou seja, a área inspecionada, os itens do check-list a serem observados e o restante da rotina permanecem o mesmo. O nível de controle proposto irá indicar pontos que são susceptíveis à demonstração de anomalias. Destaca-se ainda que, tão importante quanto o monitoramento de valores de deslocamentos absolutos ocorridos, é a observação das tendências de movimentação da estrutura, como o aumento linear ou progressivo dos deslocamentos medidos.

1.1.1.Método de verificação

Para verificação do atingimento do nível de controle, deve-se subtrair o deslocamento acumulado do dia anterior à inspeção com o deslocamento acumulado da última inspeção realizada (14 dias anteriores). Este valor deverá ser comparado ao nível de controle estabelecido e, caso inferior (valor esperado), mantem-se a rotina operacional normal, caso superior (nível de controle atingido), procede-se com a inspeção detalhada na região do marco superficial.

A determinação do deslocamento acumulado por estar sujeito a efeitos climatológicos e leituras a cada 30 minutos são muito sensíveis a este efeito, portanto, é importante definir um método para a sua determinação. Para o estudo foi utilizada a mediana diária.

5.2 Definição do Nível de Controle

A Tabela 1 mostra os fatores de desvio padrão aplicados à mediana, considerados para a análise dos recalques.

Tabela 1 - Múltiplos do Desvio Padrão Global (DPG).

Desvio Padrão Global (DPG)	1 x DPG	2 x DPG	3 x DPG	4 x DPG	5 x DPG
2,5	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5

Com base nos valores adquiridos, foi realizado uma avaliação da variação do atingimento do nível de controle para as quinzenas em que ocorreram inspeção visual, utilizando os registros de leitura compreendidos entre 01/01/2022 e 09/03/2025. A análise também considerou os fatores apresentados na tabela acima. Em

complemento, a Figura 5 demonstra a quantidade de vezes que cada marco superficial avaliado no estudo atingiu o nível

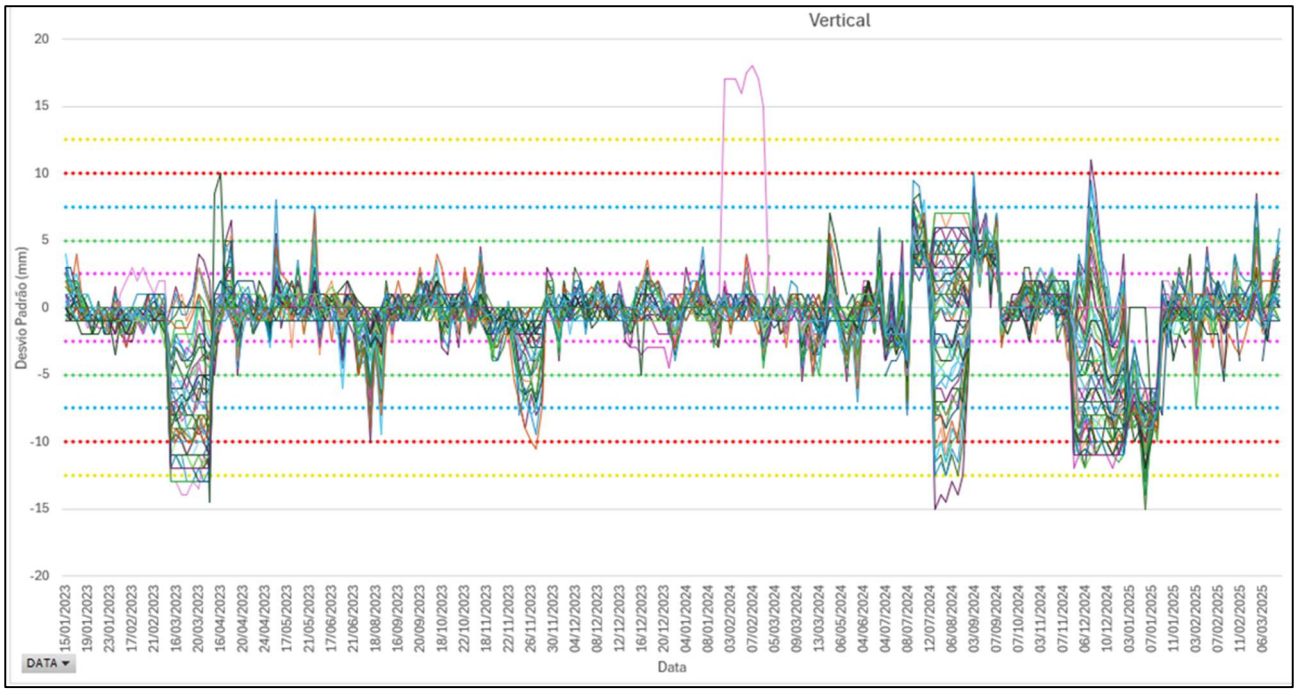


Figura 5 - Verificação do atingimento do nível de controle.

A partir da avaliação dos dados de deslocamento vertical, não foram identificadas leituras que indicassem uma tendência de recalque nociva à performance da estrutura. Além disso, é possível observar também congruência no comportamento dos marcos.

É importante destacar que os pontos em que há movimentações acentuadas das leituras em conjunto (degraus), correspondem aos momentos de calibração da ETR ou situaçõe em que o equipamento foi retirado do ponto de instalação. Após esses eventos, identifica-se o retorno ao comportamento histórico do instrumento.

Nota-se também que, durante o período avaliado, ocorreram algumas leituras anômalas. Essas leituras podem estar associadas a fenômenos climáticos, como as variações de temperatura e pressão, ou a fenômenos externos, como as movimentações de equipamentos, obras ou tráfego de veículos.

Observa-se que a maioria dos dados analisados apresentam valores inferiores a cinco vezes a mediana, o que indica um desvio padrão de menor que 12,5 mm no eixo vertical. Com base nesses resultados, foi realizada uma análise da frequência de leituras que atingiram os valores iguais ou superiores a cinco vezes ao DPG. A Tabela 2 mostra os resultados encontrados.

Tabela 2 - Acionamentos históricos verificados.

Instrumento	Acionamentos	Distância Inclinada
MS-01	6	623,169
MS-02	1	573,441
MS-03	1	566,094
MS-05	1	515,991
MS-06	1	509,543
MS-08	1	466,218
MS-12	1	416,638
MS-14	1	404,876
MS-19	8	331,264

Tabela 2 - Acionamentos históricos verificados. - Continuação

Instrumento	Acionamentos	Distância Inclinada
MS-43	6	145,464
MS-54	1	114,506
MS-58	3	70,371
MS-59	8	50,274
MS-60	8	43,975
MS-64	3	57,514

A análise da quantidade de atingimentos do nível de controle identificou, ao longo de todo o histórico avaliado, um máximo de 50 ocorrências na direção vertical, considerando os eventos de anômalos da base de dados.

Quando se desconsidera os eventos anômalos, o nível de controle nunca foi atingido, esse resultado reforça que tais movimentações acentuadas não fazem parte do comportamento histórico dos marcos superficiais.

O maior valor atingido foi de 10,0 mm (4xDPG) e não foram observadas a materialização de anomalias visuais no entorno dos marcos superficiais, portanto, decidiu-se por manter o valor de 12,5 mm (5xDPG) como nível de controle para a estrutura.

5. CONCLUSÃO

O estudo compreendeu toda a avaliação de *Quality Assurance and Quality Control* (QA/QC) da base de dados de marcos superciais lidos por ETR. Este processo demonstrou a qualidade e robustez deste monitoramento, absorvendo situações rotineiras, obras de engenharia, processo de manutenção e calibração dos equipamentos. O julgamento de engenharia associado à estatística aplicada corroborou para uma operação segura, reforçando a importância do monitoramento de deslocamentos superficiais.

A determinação do Desvio Padrão Global (DPG) considerou o comportamento geotécnico esperado das estruturas e sua verificação indicou um mútiplo de 5 vezes o DPG como nível de controle.

Importante reforçar que o recurso estátistico não sobrepõe o julgamento de engenharia, tampouco exime a necessidade de avaliar toda a instrumentação sob a perspectiva da análise geotécnica. Uma movimentação isolada de um marco superficial não necessariamente caracteriza uma zona potencial de ruptura de toda estrutura, uma vez que avarias, danos localizados, choques com outros equipamentos, vandalismo e mesmo erros de leitura são passíveis de ocorrer nos instrumentos ao longo do tempo. Sendo assim, a metodologia é apenas indicativa e orientativa, de modo a subsidiar as necessidades de avaliações mais criteriosas para uma tomada de decisão quanto aos níveis de segurança da barragem. Um instrumento nunca deverá ser analisado de forma isolada, fora de um contexto de avaliação da condição integral da estrutura, para situação de atingimento de níveis de controle, é necessário o complemento da análise multidisciplinar com a presença de equipes de engenharia responsáveis pela estrutura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEEZ, A.; KARIMZADEH, S.; VALIZADEH KAMRAN, K.; MATSUOKA, M. *Deformation analysis of embankment dam using field survey and multisensor InSAR time-series: A case study of Mosul Dam, Iraq*. Turkish Journal of Remote Sensing, v. 7, n. 2, p. 244–262, 30 dez. 2025. DOI: 10.51489/tuzal.1690530.

CLARKSON, Luke; WILLIAMS, David John. *Critical review of tailings dam monitoring best practice*. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 34, n. 2, p. 119–148, 2019. DOI: 10.1080/17480930.2019.1625172.

CLARKSON, Luke; WILLIAMS, David. Catalogue of real-time instrumentation and monitoring techniques for tailings dams. Mining Technology, [S.L.], v. 130, n. 1, p. 52-59, 2 jan. 2021. Informa UK Limited. http://dx.doi.org/10.1080/25726668.2021.1874094;

KANG, Gi-Chun. Improving reliabilities of dam displacement based on monitoring given points by total station. Journal of the Korean Geosynthetics Society, v. 16, n. 1, 2017. DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2017.16.1.001

MARR, W. Allen. Instrumentation and Monitoring of Slope Stability. Geo-Congress 2013 ASCE, [S. l.], p. 2231-2252, 2013.