

Metodologia de QA/QC para piezômetros automatizados: procedimentos de instalação e aceitabilidade dos dados de monitoramento

Lilian T. Maier Swinka

Gerente de Inspeção e Monitoramento, Fugro, Curitiba, Brasil, lilian.maier@fugro.com

Laísa Berno Benetti

Engenheira de Obras, Fugro, Curitiba, Brasil, laisa.benetti@fugro.com

Renathielly F. Silva Brunetta

Consultor técnico, Fugro, Curitiba, Brasil, r.brunetta@fugro.com

Matheus Orchulhak de Oliveira

Assistente técnico, Fugro, Curitiba, matheus.oliveira@fugro.com

Vitor Pereira Faro

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitorpereirafaro@gmail.com

RESUMO: Piezômetros automatizados oferecem vantagens significativas para o monitoramento em tempo real dos níveis de água subterrânea e da pressão da água permitindo avaliar o comportamento e a estabilidade de estruturas geotécnicas. No entanto, garantir medições precisas e confiáveis desses piezômetros exige uma abordagem sistemática com procedimentos robustos de garantia e controle de qualidade (QA/QC). A demanda crescente por processos rigorosos e gestão de qualidade em projetos de mineração é impulsionada por mudanças regulatórias, avanços tecnológicos e expectativas da sociedade. A metodologia proposta enfatiza a adesão aos padrões estabelecidos por normas e as melhores práticas. Os procedimentos de QA envolvem um plano de instrumentação detalhado que respalda o processo de instalação, garantindo que todos os requisitos para a automação de piezômetros sejam atendidos e possíveis erros mitigados. Os procedimentos de QC concentram-se na verificação da instalação, no monitoramento contínuo, na validação dos dados e na avaliação de desempenho, assegurando que a implementação da metodologia de QA/QC atenda aos requisitos técnicos e operacionais para cada instrumento. Implementar essa abordagem resulta em benefícios como maior eficiência, precisão aprimorada dos dados e uma melhor compreensão do comportamento das estruturas geotécnicas. Nesta pesquisa, a metodologia foi aplicada à automação de seis piezômetros e o desempenho das leituras automatizadas foi avaliado com base em dois critérios de aceitabilidade propostos, com resultados indicando uma correlação satisfatória entre leituras manuais e automatizadas.

PALAVRAS-CHAVE: Instrumentação Geotécnica, Piezômetros, Automação, QA/QC, Mineração. Confiabilidade dos Dados.

ABSTRACT: Automated piezometers provide significant advantages in monitoring groundwater levels and water pressure, delivering real-time data for assessing the behavior and stability of structures. However, ensuring the accuracy and reliability of measurements from these automated piezometers requires a systematic approach and robust quality assurance and quality control (QA/QC) procedures. Demand for rigorous processes and quality management aimed at mining projects has increased in recent years due to changes in legislation, technological advancements, and societal expectations. The proposed methodology emphasizes the importance of adhering to established standards and best practices. Quality assurance procedures involve a meticulous instrumentation plan that supports the installation process, ensuring all requirements for piezometer automation are met and potential sources of error are mitigated. Quality control procedures focus on verify installation and post-installation, instrument monitoring, data validation, system maintenance, and performance evaluation, ensuring that the QA/QC methodology meets the technical and operational requirements for which it was designed. Implementing this approach offers benefits such as increased

efficiency, enhanced real-time data accuracy, and a better understanding of geotechnical structure behavior. In this research, the proposed methodology was applied to automate six piezometers, and the performance of automated readings was evaluated based on two proposed acceptability criteria, with results indicating satisfactory correlation between manual and automated readings.

KEYWORDS: Geotechnical Instrumentation, Piezometers, Automation, QA/QC, Mining, Data Reliability

1 INTRODUÇÃO

Pilhas de estéril e rejeito associados a grandes minas a céu aberto são as maiores construções feitas pelo homem na Terra em termos de volume e massa (Hawley; Cunning, 2017). Outras estruturas de apoio à mineração, como barragens e diques, também consistem em grandes obras de terra. Considerando a magnitude dessas instalações, é imperativo aplicar abordagens de controle de qualidade para o monitoramento destas estruturas.

No contexto das estruturas de disposição de rejeitos, o GISTM (2020) enfatiza a importância de gerenciar a qualidade e a adequação do processo de construção e operação por meio da implementação de mecanismos de controle de qualidade, garantia de qualidade e aderência entre o projeto x obra. Isso é considerado um requisito fundamental do princípio de planejar, construir e operar a estrutura de disposição de rejeitos de modo a garantir a gestão de riscos em todas as fases do ciclo de vida das estruturas.

A motivação para o uso da metodologia de QA/QC vem da necessidade de verificar e controlar atividades de instrumentação e monitoramento geotécnico para garantir que o resultado dos dados coletados em campo forneça uma avaliação representativa das condições das estruturas geotécnicas, que são então usadas para avaliação do desempenho e da segurança das estruturas (SWINKA, 2023).

Os estudos de QA/QC desempenham um papel importante especialmente em projetos de instrumentação e monitoramento geotécnico, pois não só contribuem para aprimorar a qualidade global do projeto, mas também asseguram sua execução de maneira padronizada.

O controle de qualidade em instrumentação geotécnica envolve um planejamento meticuloso, incluindo a seleção de instrumentos apropriados, o estabelecimento de procedimentos de calibração e a definição de protocolos de instalação. Esses métodos garantem que os instrumentos sejam precisos e capazes de fornecer dados confiáveis. O QA se concentra na implementação adequada dos planos de instrumentação, especificações técnicas, terminando no planejamento de como os dados serão utilizados. O QC tem o objetivo de assegurar que o projeto atenda aos requisitos técnicos estabelecidos. Durante a instalação, ferramentas de gestão da qualidade são utilizadas para verificar se os instrumentos estão instalados corretamente, calibrados e monitorados de forma a garantir funcionalidade e precisão contínuas. Eventuais desvios são identificados e corrigidos prontamente para manter a confiabilidade dos dados coletados. Ao integrar práticas de QA e ferramentas de QC, é possível aumentar a confiabilidade dos dados coletados de instrumentos, como piezômetros, e apoiar decisões críticas relacionadas à estabilidade das estruturas geotécnicas.

Ang e Tang (1984) foram pioneiros na aplicação de conceitos probabilísticos ao planejamento e projeto de engenharia e já destacavam a necessidade da redução de incertezas para tomadas de decisão. Na engenharia geotécnica, esses esforços são mais recentes. Gilbert, *et al.* (2017) defende a necessidade de estudar as incertezas inerentes aos materiais e condições do solo a fim de garantir a segurança das estruturas geotécnicas. No presente artigo, tem-se como objetivo apresentar uma proposta de metodologia de QA/QC para instalação de piezômetros automatizados e discutir os critérios de aceitabilidade, que podem ser utilizados como objetivos de qualidade na obtenção de informações, que são essenciais para tomadas de decisão no âmbito da geotecnia.

A metodologia proposta inclui etapas detalhadas de planejamento, instalação, calibração e manutenção, bem como a utilização de ferramentas de controle e procedimentos técnicos rigorosos para garantir a confiabilidade dos dados de monitoramento. Além disso, o artigo aborda a importância das auditorias internas regulares e das ações corretivas para manter a precisão e a integridade dos dados coletados. Desta forma, busca-se contribuir para a redução das incertezas e a melhoria contínua dos processos de monitoramento geotécnico, mantendo a segurança e a eficiência das operações.

2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE QA/QC

Para que a instrumentação assuma um papel importante na manutenção da segurança de estruturas geotécnicas é de fundamental importância combinar o uso de tecnologias, como a automação dos piezômetros, com a aplicação da metodologia de QA/QC para reduzir a magnitude dos erros nos projetos, especificações, instalação, obtenção, análise e tratamento dos dados coletados. A identificação precoce de problemas, a padronização de procedimentos e a documentação adequada podem melhorar a qualidade dos dados e a confiabilidade das informações geotécnicas.

2.1 Garantia de qualidade na instalação de piezômetros automatizados

Na busca da qualidade na instalação automatizada de piezômetros foi proposta uma metodologia abrangente de garantia da qualidade. Conforme ilustrado na Figura 1, esta abordagem compreende quatro etapas: Projeto, Instalação, Automação e Controle de Qualidade. Juntos, esses estágios formam a base para a precisão e a confiabilidade durante todo o ciclo de vida dos projetos de piezômetros automatizados. Desde as considerações iniciais do projeto até a análise dos dados coletados, essa metodologia estabelece uma diretriz estruturada para fornecer resultados confiáveis no domínio da instalação automatizada de piezômetros.

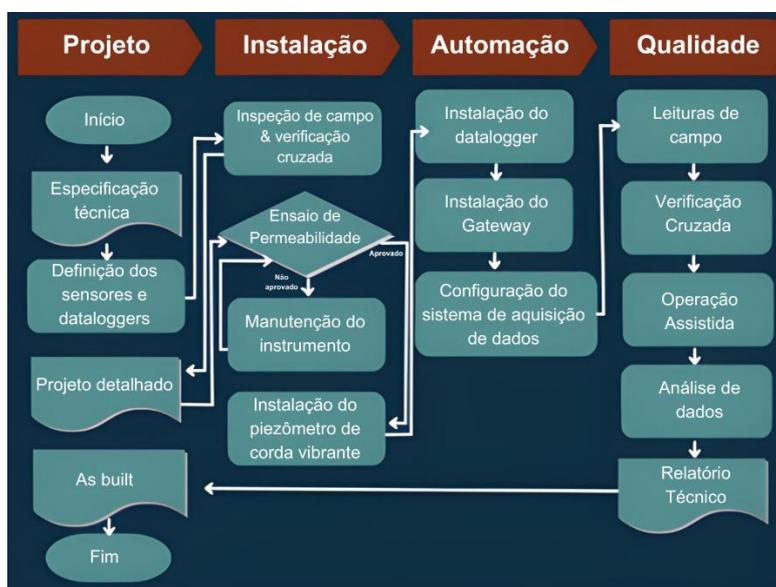


Figura 1. Processo esquemático da garantia da qualidade da instalação automatizada de piezômetros.

Além das etapas citadas anteriormente, é importante ressaltar a necessidade da realização de testes de bancada nos sensores e no sistema de aquisição e transmissão de dados para confirmar sua plena funcionalidade antes da instalação em campo.

Esses testes de bancada garantem que os sensores estejam corretamente calibrados e que o equipamento esteja operando de acordo com as especificações desejadas antes de sua instalação em campo. Isto contribui para garantir a qualidade e confiabilidade dos dados coletados pelo sistema automatizado de medição. Outro ponto importante é garantir que as especificações técnicas estejam alinhadas com os objetivos de monitoramento da estrutura. A descrição e explicação detalhada de cada uma dessas etapas são bastante extensas; portanto, não são apresentados neste artigo, mas podem ser referidos em Swinka (2023).

2.2 Controle de qualidade na instalação de piezômetros automatizados

A Figura 2 ilustra uma proposta de metodologia abrangente de controle de qualidade para piezômetros automatizados. Esta metodologia baseia-se em 4 etapas principais: estabelecimento de padrões, avaliação da

conformidade, ação corretiva quando necessária e o planejamento para a melhoria. Através da integração destes 4 pilares, esta abordagem fornece uma estrutura robusta para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados dos piezômetros automatizados.



Figura 2. Controle de qualidade na instalação de piezômetros automatizados.

A estratégia envolve o uso de ferramentas de controle (fichas de registro, carta de controle, fluxograma de processos, diagrama de Ishikawa, etc.) e procedimentos técnicos. Na avaliação de conformidade, a comparação entre leituras manuais e automatizadas é fundamental para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados coletados, com verificação cruzada regular dos dados para identificar possíveis anomalias no processo (outliers) de instalação. A realização de ações corretivas, sempre que necessário, inclui calibrações, reinstalações, manutenções, substituição de sensores ou equipamentos e treinamento da equipe. O planejamento para a melhoria pode envolver a realização de auditorias internas regulares para verificar a conformidade com os padrões estabelecidos e identificar oportunidades de melhoria. Ao implementar essa metodologia, torna-se possível manter a precisão e a confiabilidade na coleta e análise de dados geotécnicos.

3 CRITÉRIOS DE ACEITABILIDADE DA LEITURA AUTOMATIZADA

Esta seção apresenta o desempenho de seis piezômetros automatizados instalados em uma mineradora na região sudeste do Brasil. A Figura 3 apresenta a planta de locação da instrumentação.



Figura 3. Planta da instrumentação

A Tabela 1 apresenta a profundidade dos piezômetros instalados.

Tabela 1. Profundidade de instalação dos piezômetros.

Instrumento	Profundidade (m)
PZ-01	17,13
PZ-02	20,10
PZ-03	14,18
PZ-04	18,28
PZ-05	12,04
PZ-06	16,08

Para avaliar a aceitabilidade das leituras automatizadas, este estudo apresenta comparações entre leituras automatizadas e manuais. Conforme mencionado anteriormente, a aplicação de metodologias de QA/QC ainda está em seus estágios iniciais na engenharia geotécnica, incluindo a instalação de instrumentos automatizados. Não existem critérios de aceitabilidade bem estabelecidos para leituras de nível piezométrico de instrumentos automatizados, portanto, profissionais da área de monitoramento de estruturas geotécnicas estão buscando defini-los (Oliveira & Chiste, 2023).

Este estudo propõe dois métodos para estabelecer critérios de aceitabilidade para piezômetros com leituras automatizadas. O primeiro método baseia-se na análise de aproximadamente cinco anos de dados históricos das diferenças absolutas entre leituras manuais de seis piezômetros. Dado que não ocorreram duas medições manuais consecutivas numa mesma data, a metodologia aplicada consistiu em calcular a diferença entre leituras manuais, subtraindo o valor cota (m) de uma data específica pelo valor da cota (m) da data de subsequente para cada piezômetro. O resultado representa a variação da cota (m) entre duas leituras consecutivas. Para calcular os limites de controle, utilizou-se a média e o desvio padrão das diferenças das leituras manuais, considerando um intervalo de confiança de 95%.

O segundo método baseia-se na comparação diária entre leituras manuais e automatizadas do mesmo piezômetro, avaliando as variações dentro dos limites de controle do processo ao compará-las com o valor-alvo da diferença das leituras manuais dos piezômetros.

3.1 Aceitabilidade baseada na diferença entre leituras manuais

Para analisar as diferenças entre as leituras, foi utilizado um conjunto de dados que compreende um total de 810 leituras obtidas manualmente de seis piezômetros Casagrande durante o período de 08/02/2017 a 17/06/2022. A periodicidade das leituras manuais era semanal até o início da automação dos piezômetros em fevereiro/2021. Após a automação, essa periodicidade passou a ser quinzenal e posteriormente mensal, otimizando os processos de monitoramento e permitindo uma análise de dados mais eficiente e contínua.

A Figura 4 apresenta essas diferenças plotadas ao longo do período analisado, juntamente com um limite inferior e um limite superior que correspondem a um intervalo de confiança de 95% ($\mu \pm 2\sigma$). Analisando a Figura 4, pode-se observar que, considerando os limites impostos, pode ocorrer uma variação de aproximadamente 20 centímetros acima ou abaixo da linha 0 nas leituras manuais.

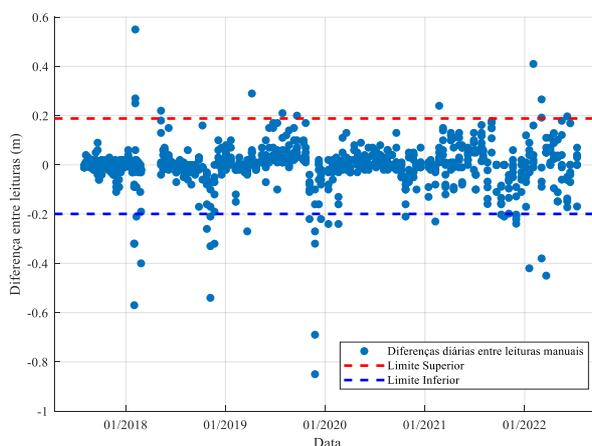


Figura 4. Série histórica de diferença entre leituras manuais.

Entre 09/02/2021 e 17/06/2022, foram realizadas leituras de nível piezométrico de forma manual e automática utilizando os seis instrumentos, resultando em um total de 120 leituras manuais e 120 leituras automatizadas. A Figura 5 (a) demonstra a relação entre leituras manuais e automatizadas durante o período em que os dados foram obtidos por ambos os métodos. A relação entre os valores obtidos nas leituras manuais e automatizadas resulta em um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9966 e uma raiz do erro quadrático médio (RMSE) igual a 0,0825. A Figura 5 (b) apresenta o histograma da diferença entre os valores de leitura manual e

automatizada, os limites de 20 cm também estão delimitados na figura. Apenas dois valores ficaram fora da faixa considerada satisfatória.

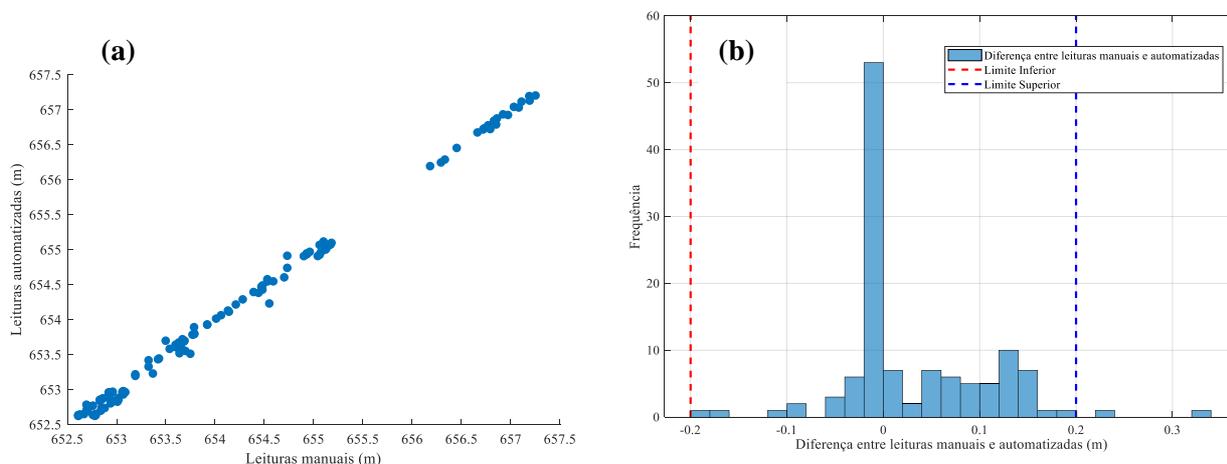


Figura 5. Relação entre a leitura manual e automatizada considerando todos os instrumentos analisados. (a) Gráfico de dispersão das leituras dos piezômetros manuais versus automatizados. (b) Histograma da diferença entre valores de leitura manual e automatizada.

3.2 Aceitabilidade com base em leituras manuais e automatizadas realizadas no mesmo período

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros estatísticos relativos ao histórico dos seis piezômetros, considerando leituras manuais (M) e leituras automatizadas (A), no mesmo período. Nesta tabela são apresentados o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) para todos os piezômetros. Isso permite avaliar quais piezômetros apresentam menores diferenças entre leituras manuais e automatizadas. Os valores de R^2 indicam que os piezômetros 2 e 3 apresentaram a correlação mais fraca entre os piezômetros analisados, o baixo coeficiente de determinação obtido nestes dois casos indica a necessidade de avaliar a confiabilidade das leituras. Porém, os valores de RMSE apresentam valores de 0,09 e 0,10 cm, como o RMSE é retornado na unidade de medida do modelo, esses valores estão em centímetros, indicando um erro relativamente pequeno quando comparado aos limites mostrados na Figura 4.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos relativos às séries históricas de leituras manuais e automatizadas

	PZ1M	PZ1A	PZ2M	PZ2A	PZ3M	PZ3A	PZ4M	PZ4A	PZ5M	PZ5A	PZ6M	PZ6A
Média	654.95	654.91	652.96	652.91	652.75	652.70	654.13	654.11	653.54	653.53	656.81	656.79
Desvio padrão	0.20	0.17	0.09	0.05	0.11	0.07	0.32	0.29	0.19	0.18	0.31	0.31
Min	654.53	654.54	652.83	652.82	652.61	652.62	653.63	653.65	653.19	653.19	656.18	656.19
Q1	654.82	654.90	652.89	652.86	652.68	652.63	653.85	653.91	653.39	653.42	656.69	656.69
Mediana	655.00	654.94	652.95	652.92	652.75	652.69	654.14	654.12	653.60	653.56	656.84	656.81
Q3	655.11	655.04	653.04	652.96	652.81	652.75	654.46	654.39	653.68	653.67	657.06	657.03
Máx	655.18	655.11	653.09	652.98	652.97	652.83	654.59	654.54	653.79	653.80	657.25	657.20
R^2	0.85		0.29		0.39		0.95		0.75		0.99	
RMSE	0.09		0.09		0.10		0.08		0.09		0.04	

A segunda proposta deste artigo para definir os critérios de aceitabilidade para leituras automatizadas é apresentada na Figura 6, que exibe séries temporais comparativas para leituras manuais e automatizadas juntamente com limites inferior e superior referenciados na Figura 4, um intervalo de confiança de 95% (μ

$\pm 2\sigma$). Nesta figura, o eixo x representa o período analisado, e o eixo y mostra um intervalo de 75 centímetros acima e 75 centímetros abaixo do valor médio das leituras manuais, resultando em uma variação de 1,5 metros. Essa padronização foi utilizada para que todos os gráficos apresentados estejam na mesma escala.

Comparando os gráficos apresentados na Figura 6, podemos observar que apesar da correlação mais fraca entre as leituras dos piezômetros 2 e 3, esses instrumentos apresentam a menor variação nas leituras. Isso pode ser verificado analisando os limites inferior e superior desses instrumentos na Figura 6 e os coeficientes de determinação desses instrumentos na Tabela 2. Os piezômetros 4 e 6 foram os instrumentos que apresentaram correlação mais forte e menor erro, resultando em um maior coeficiente de determinação.

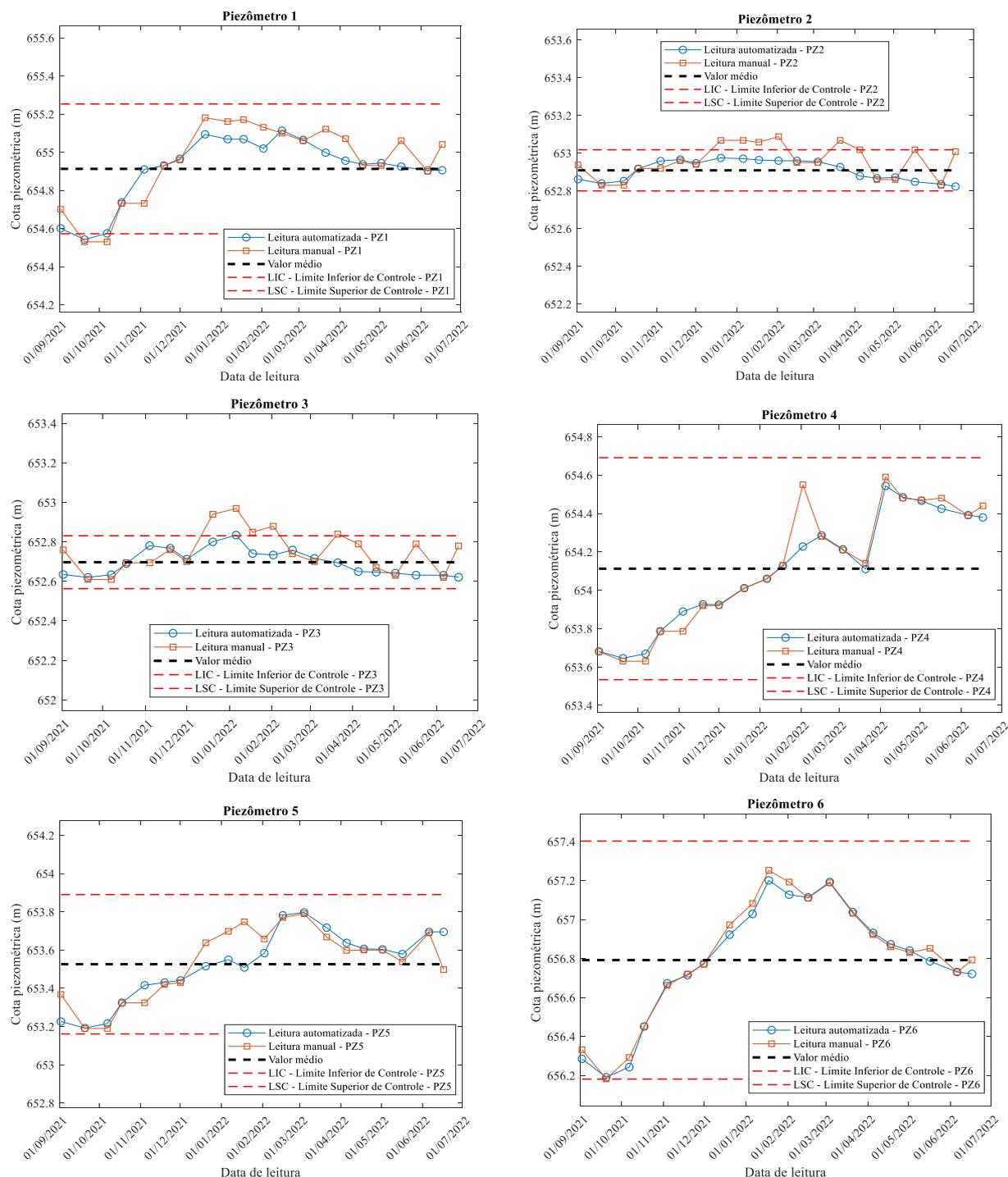


Figura 6. Comparação entre leituras manuais e automatizadas.

4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

Considerando os métodos apresentados, as principais vantagens e limitações na análise são:

Vantagens:

- O método é relativamente simples de ser aplicado e pode trazer resultados práticos e objetivos, no sentido de alertar a equipe responsável pelo monitoramento dos instrumentos e pela segurança da estrutura monitorada quando algo está fora da normalidade, como quando um instrumento atinge um valor pouco frequente e/ou até então nunca registrado no histórico de monitoramento.
- A aplicação da metodologia proposta permitiu identificar outliers das leituras manuais durante a análise dos dados das séries históricas, o que é útil na avaliação da consistência dos dados.
- Oferece suporte à rotina de verificação das leituras automatizadas, identificando o desempenho do processo por meio de análise estatística dos dados.

Limitações:

- Treinamento e Governança de Equipes: A metodologia apresentada pode encontrar limitações relacionadas ao treinamento de equipes, necessitando de treinamento especializado para garantir a execução eficaz de todos os processos. Além disso, há necessidade de um plano de governança adequado para garantir o compromisso entre as diferentes áreas envolvidas no projeto, o que pode representar um desafio em termos de coordenação e alinhamento de objetivos.
- Gerenciamento de banco de dados: Outra limitação diz respeito ao gerenciamento de banco de dados e da série histórica, principalmente na garantia de um fluxo claro de informações sobre a estrutura. A gestão eficaz da base de dados é essencial para facilitar o acesso contínuo a informações relevantes, mas podem surgir desafios na manutenção da consistência, organização e acessibilidade da informação em todo o projeto.

5 RESUMO E CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma proposta de metodologia QA/QC para instalação de piezômetros automatizados. Os principais destaques e conclusões são:

- Mesmo identificando uma pequena variabilidade no processo, os resultados obtidos com a implementação da metodologia acima mencionada, bem como o trabalho de sensibilização com os técnicos de campo, mostraram uma variação nas leituras dentro de uma faixa limite e que reflete a confiabilidade dos dados coletados após a automação e uma melhoria significativa no processo.
- Na busca pela qualidade na instalação automatizada de piezômetros, é introduzida uma metodologia abrangente de controle de qualidade desde a etapa de projeto até o monitoramento do dado usando ferramentas de controle que auxiliam na busca por resultados confiáveis no âmbito da instalação automatizada de piezômetros.
- Para garantir a qualidade da automação da instrumentação geotécnica, é fundamental estabelecer padrões e procedimentos, selecionar e treinar uma equipe competente, realizar auditorias internas regulares, verificar os dispositivos regularmente, confirmar a instalação correta dos instrumentos e garantir a coleta e registro precisos de dados. A calibração deve ser realizada por profissionais experientes seguindo as orientações do fabricante, e os dados devem ser verificados cruzadamente quanto à precisão e confiabilidade.
- Foram apresentados dois métodos para estabelecer critérios de aceitabilidade para leituras automatizadas. O primeiro método baseia-se nas diferenças entre leituras manuais de vários instrumentos, enquanto o segundo método envolve a comparação de leituras manuais do instrumento com leituras automatizadas do mesmo instrumento durante um período específico. A escolha do método depende dos dados disponíveis.

- Ressalta-se que a adoção dos critérios de aceitabilidade utilizados em cada abordagem de QA/QC deve ser tecnicamente fundamentada e justificada nos métodos de controle como um objetivo de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à mineradora Anglo American pela sua contribuição fundamental ao fornecer os dados que possibilitaram esta pesquisa, e à Fugro pelo apoio técnico fornecido durante o estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ang, A.H.S., Tang, W.H. (1975). Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, risk and reliability. *Califórnia*: Wiley. 572 p.
- Gilbert, R. B., Najjar, S. S., Dellinger, G., Allen, J. M. M. (2017). The Probabilistic Aspects of QA-QC for Geotechnical Applications. *Geotechnical Safety and Reliability, Austin*, v. 1, n. 1, p. 325-349, jun. 2017. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784480731.027>.
- Hawley, M., Cuning, J. (2017). Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Design. Leiden: Crc Press/Balkema, 369 p.
- Oliveira, C. S., Chiste, J. P., (2023). Definition of statistical acceptance criteria for automated piezometer readings. *Proceedings of Tailings 2023*. Santiago, Chile. pp. 1–8.
- GISTM (2020) *Padrão global da indústria para a gestão de rejeitos*. Disponível em: <<https://globaltailingsreview.org/>>. Acesso em: 03 de mai. 2024.
- Swinka, L.T.M (2023) *Proposta de metodologia de QA/QC no processo de automação de piezômetros: estudo de caso em uma estrutura geotécnica da mineração*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 172 p.