

Estratégias de Implementação de Monitoramento Automatizado com Estações Totais Robóticas na Mineração

Otávio Pataro Generoso Sales

Supervisor de Monitoramento, Hexagon, Belo Horizonte, Brasil, otavio.pataro@gmail.com

Pamela Lisboa Ferreira

Engenheira Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, pamelalisboa19@yahoo.com.br

RESUMO: A Estação Total Robótica é um equipamento de monitoramento de deslocamento superficial, utilizado para medir a magnitude e velocidade dos movimentos com o objetivo de avaliar tendências de deslocamentos em diversas estruturas, como barragens, pilhas e cavas de mineração e taludes de rodovias. Nesse sentido, é importante ter sistemas confiáveis que permitam analisar a movimentação real de uma estrutura geotécnica e distinguir de uma possível movimentação do próprio sistema de monitoramento. A instalação bem-feita da tecnologia de acordo com padrões definidos fortalece uma confiabilidade no monitoramento, porém, podem ocorrer movimentações no sistema e sua identificação através da análise de dados é crucial. Nesse cenário, a infraestrutura de instalação da estação exerce uma influência significativa na otimização do uso do equipamento. Este estudo, por meio de exemplos e análises de casos práticos, tem como objetivo fornecer orientações acerca das estratégias mais eficazes na implementação de um sistema de monitoramento automatizado através de Estações Totais Robóticas no contexto da mineração.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento Automatizado, Geotecnia, Estação Total Robótica

ABSTRACT: The Robotic Total Station is surface displacement monitoring equipment, used to measure the magnitude and speed of movements with the aim of evaluating displacement trends in various structures, such as dams, mining piles and pits and highway embankments. In this sense, it is important to have reliable systems that allow analyzing the real movement of a geotechnical structure and distinguishing it from possible movement of the monitoring system itself. Properly installed technology in accordance with defined standards strengthens monitoring reliability, however, movements may occur in the system and their identification through data analysis is crucial. In this scenario, the station installation infrastructure has a significant influence on optimizing the use of the equipment. This study, through examples and analyzes of practical cases, aims to provide guidance on the most effective strategies in implementing an automated monitoring system through Robotic Total Stations in the mining context.

KEYWORDS: Automated Monitoring, Geotechnics, Robotic Total Station

1 INTRODUÇÃO

A imperativa demanda por abordagens altamente eficientes, precisas e robustas no monitoramento de deslocamentos na indústria de mineração tem impulsionado a adoção das Estações Totais Robóticas como um componente essencial no escopo do monitoramento geotécnico. Essa tecnologia estabeleceu-se como uma ferramenta indispensável, oferecendo uma resposta inovadora aos desafios complexos enfrentados no setor. Recomendadas especialmente para monitoramentos de longo prazo, como os relacionados a barragens, e em ambientes mais dinâmicos, como as cavas de mineração, as Estações Totais Robóticas destacam-se como soluções versáteis e adaptáveis.

No entanto, a implementação ideal dessas tecnologias enfrenta desafios, pois cada equipamento possui recomendações específicas de uso. Alcançar essas recomendações nem sempre é viável devido a diversas variáveis, como a condição de visada do equipamento para a região de interesse, a infraestrutura que o circunda, o preciso posicionamento e alinhamento da estação em direção ao alvo, e o método de orientação utilizado, entre outros.

Nesse contexto, a infraestrutura de instalação da estação desempenha um papel crucial na maximização da eficiência do equipamento. Em particular, a configuração geométrica da quina do abrigo onde o equipamento está instalado tem o potencial de reduzir a área de visada a depender de sua configuração. A compreensão e a mitigação desses desafios tornam-se cruciais para assegurar não apenas o desempenho ideal do equipamento, mas também resultados consistentes e práticos em suas operações.

Este estudo busca oferecer orientações sobre as estratégias mais eficazes para implementar um sistema de monitoramento automatizado usando Estações Totais Robóticas na indústria da mineração, por meio de exemplos e análises de casos práticos. Além disso, busca destacar os fatores relevantes que devem ser considerados ao planejar e executar um programa de monitoramento nesse ambiente específico.

1.1 Estação Total Robótica (ETR)

A Estação Total Robótica (ETR) é um equipamento eletro-óptico utilizada para monitorar os deslocamentos superficiais, com capacidade de mapear a evolução de deslocamentos a curto e longo prazo de forma automática. É um equipamento de alta precisão para realização do monitoramento de deslocamentos horizontais e verticais a partir de uma base georreferenciada e de pontos fixos instalados na estrutura, como marcos superficiais e prismas de monitoramento. Através desse sistema, georreferenciado, obtém-se a movimentação real nos três eixos de coordenadas (Leste, Norte e Cota), e o deslocamento do ponto nas variáveis: direção, grandeza e velocidade do movimento.

Na literatura, muitos estudos de caso de análise de monitoramento automatizado têm sido apresentados e discutidos (Crosta et al., 2015; Giordan et al., 2013; Loew et al., 2017). De acordo com esses trabalhos, o deslocamento da superfície (ou seus derivados, ou seja, velocidade e aceleração) recebe mais atenção, pois é amplamente utilizado no campo do monitoramento de deslizamentos de terra ou de rochas para estabelecer limiares de velocidade para fins de alerta precoce (Giordan et al., 2019; Intrieri et al., 2012; Segalini et al., 2018), e às vezes para prever o tempo de falha (Fukuzono, 1985; Intrieri et al., 2019). No entanto, há uma escassez de orientações específicas sobre as estratégias mais eficazes de implementação desses sistemas automatizados de monitoramento e suas consequências nos dados quando essas orientações não são seguidas. Os principais autores encontrados que discutem sobre o tema, tais como Afeni e Cawood (2013) e Thomas (2011), apresentam os seus estudos através de das lições e experiências aprendidas no monitoramento de cavas a céu aberto da África do Sul.

Para qualquer tecnologia de monitoramento, antes da realização de uma análise de dado ou tomada de decisão desencadeada por essa análise, um dos itens primordiais é a garantia da qualidade e confiabilidade da informação. Com isso, é fundamental que se tenha entendimento dos parâmetros relacionados a condições de normalidade e anormalidade nos dados, evitando-se assim conclusões subjetivas ou equivocadas.

Dentro os diversos motivos que podem gerar ruídos nas leituras ou perda dessas leituras durante o monitoramento da Estação Total Robótica, pode-se citar, por exemplo, o erro devido a precisão do aparelho, condições atmosféricas (temperatura, pressão e umidade), precisão de refletância dos prismas de alvo e referenciais, uma rede de referência mal projetada, locais instáveis para as estações de monitoramento e pontos de referência, pequena visão da área a ser monitorada e, por fim, consideração da distância entre a estação total e os prismas alvo e referenciais.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste artigo baseia-se na compilação de informações provenientes de diversos exemplos de monitoramento utilizando Estações Totais, como a TM50 da Leica Geosystems, no ambiente de mineração da Vale S.A. Para isso, foram analisados casos práticos, bem como artigos e dissertações de mestrado publicados por referências reconhecidas no campo da engenharia geotécnica e da topografia.

A partir da revisão e análise dessas fontes, foram identificadas e discutidas orientações relevantes e estratégias eficazes para a implementação de sistemas de monitoramento automatizado por Estações Totais Robóticas no contexto da mineração. As informações obtidas foram sintetizadas e apresentadas neste artigo para fornecer diretrizes úteis e práticas para profissionais envolvidos no monitoramento de estabilidade de taludes em operações mineradoras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condição de Leitura e Posicionamento dos Prismas de Referência

A integridade de um sistema de monitoramento georreferenciado depende muito da precisão do levantamento das coordenadas dos prismas de referência e da base da estação, que fazem parte da rede de referência de levantamento, Sharon, R e Eberhardt, E (2020). Portanto, é importante ter uma rede de referência de levantamento confiável como base de qualquer sistema de monitoramento de deformação georreferenciado. A importância de ter um design de rede de controle robusto é enfatizada por Thompson (2005), que observou que uma rede mal projetada resultará em erros de orientação e causará resíduos que levarão o sistema para fora do limite de tolerância, o que afetará a precisão do levantamento.

Outro fator importante é a condição de leitura e posicionamento dos prismas de referência, que desempenha um papel crucial na precisão dos resultados obtidos a partir dos prismas de monitoramento. Como ilustrado na Figura 1, a proximidade de um único prisma de referência (40 metros de distância da estação total) influencia significativamente nos dados vetoriais coletados dos prismas de monitoramento. Além disso, durante dias chuvosos, observa-se um aumento na variação angular horizontal do prisma de referência, o que pode ter um impacto substancial nos resultados. Esta variação pode induzir as interpretações dos deslocamentos dos prismas de monitoramento em sentido transversal à linha de visada da ETR conforme é possível verificar nos gráficos de dispersão que foram separados em dois períodos, um com melhor qualidade e outro com condições adversas (período de chuva).

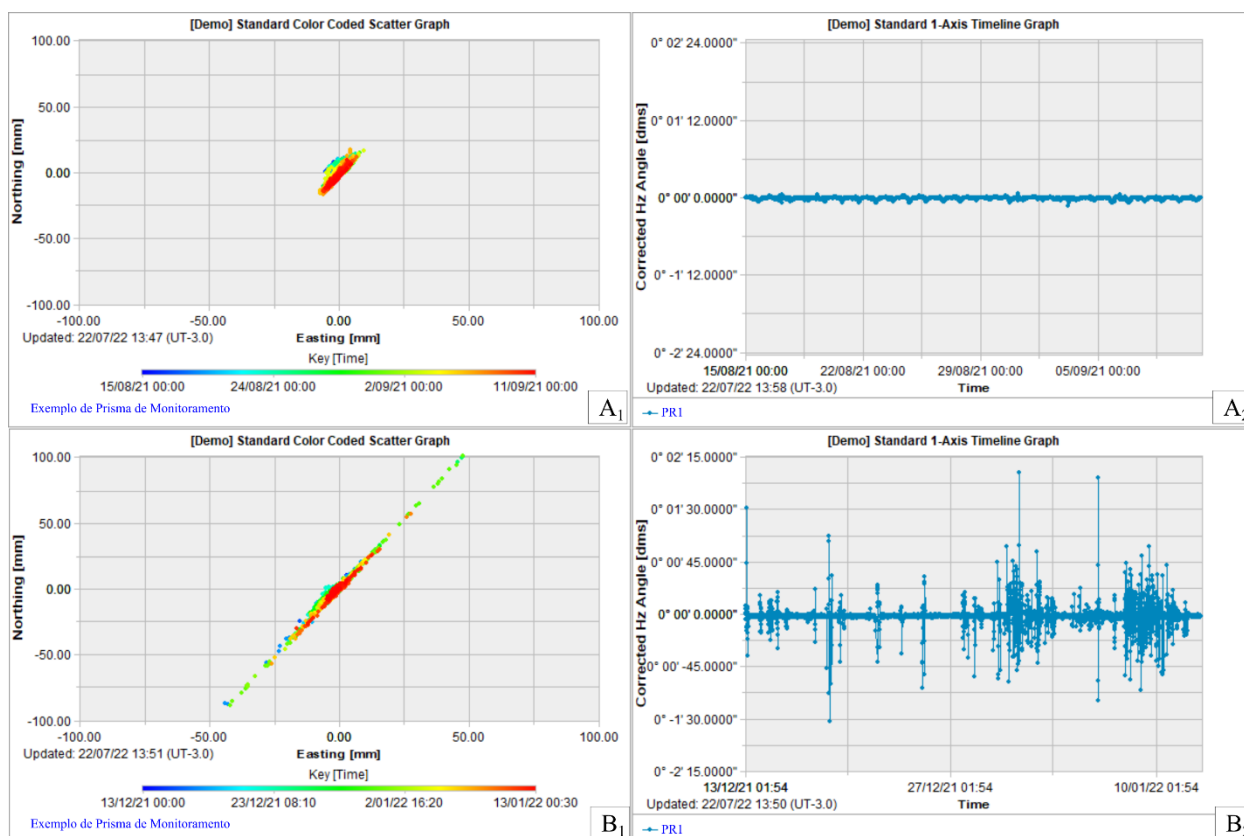


Figura 1 – Gráficos de dispersão de prismas de monitoramento (A₁ e B₁) e gráficos do ângulo horizontal corrigido (A₂ e B₂) do prisma de referência de um sistema de monitoramento. O momento "A" representa um período seco, e o momento "B" representa um período com chuvas. (Fonte: Vale & Hexagon)

Para exemplificar o efeito citado anteriormente, segue na Figura 2 uma representação gráfica do aumento da dispersão gerada nos prismas monitorados devido a proximidade de um prisma de referência em relação à estação total robótica. No esquema abaixo, as variações do Ângulo Horizontal Corrigido dentro da

geometria adotada para o prisma de referência PR1 encontra-se muito próximo à ETR o que maximiza os efeitos de oscilação das componentes 2D dos demais pontos de observação.

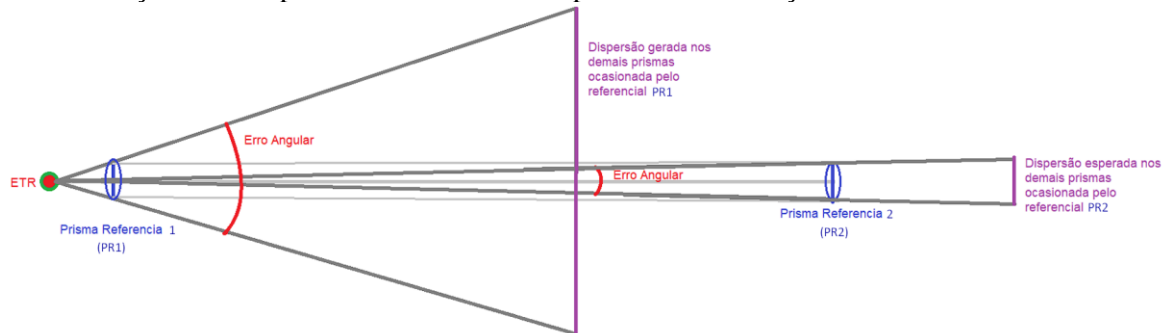


Figura 2 – Representação gráfica da influência da distância entre a estação total e os prismas alvo e referenciais nos dados angulares horizontais. (Fonte: Elaboração Própria.)

4.2 Local, Visada e Infraestrutura de Instalação do Equipamento

A localização onde o equipamento é instalado tem um impacto substancial nos resultados obtidos dos prismas de monitoramento. Se um equipamento de altíssima precisão for colocado em um local propenso a movimentos, esses movimentos serão transmitidos para todos os prismas monitorados. É crucial considerar a adoção de um método de orientação da estação total que ajude a identificar e mitigar esses movimentos, compensando vetorialmente o deslocamento calculado da estação em relação aos prismas monitorados. Para aplicar esse método, no entanto, é necessário instalar pelo menos três prismas de referência considerados estáveis, para calcular a posição da estação total usando o método de estação livre (FreeStation). Se os referenciais usados nesse método não estiverem estáveis, o cálculo da posição do instrumento será afetado, resultando na replicação parcial desses movimentos nos prismas monitorados, afetando assim a qualidade do monitoramento.

Por outro lado, se o local de instalação for bem planejado e estável, as medições feitas pelo instrumento não serão afetadas, e não será necessário instalar mais prismas de referência. Nesse caso, o uso do método de orientação única (Orientation Only) seria suficiente. Essas considerações destacam a importância de escolher cuidadosamente o local de instalação do equipamento e a diferença entre os métodos de orientação que podem auxiliar a garantir a precisão e confiabilidade dos resultados do monitoramento.

Portanto, é recomendável confirmar as posições finais dos marcos com uma avaliação no local realizada por um engenheiro geotécnico e um topógrafo antes do início da construção. Esse processo garante que as posições propostas dos marcos estejam em terreno estável e evitem características de movimento ativo ou potencial, que podem não ter sido identificadas nos mapas durante o reconhecimento da área. O topógrafo também deve assegurar que não haja obstrução ao longo da linha de visada. Essa metodologia é recomendada por Thomas (2011).

Outro aspecto crucial no planejamento do sistema de monitoramento é a infraestrutura de instalação da estação e dos prismas. Ambos desempenham um papel fundamental na maximização da eficiência do equipamento. Um exemplo de mau planejamento da infraestrutura que pode aumentar o risco associado ao trabalho em alturas e provocar movimentações devido à instabilidade do marco geodésico onde a estação foi instalada está representado na Figura 3A. Além disso, a configuração geométrica da quina do abrigo onde o equipamento está instalado tem o potencial de reduzir a área de visada do equipamento, devido às paredes que diminuem a abertura total de visada que a estação possui.



Figura 3 – Exemplos de marcos geodésicos mal (Figura A) e bem planejado (Figura B). (Fonte da Figura A: Própria & Fonte da Figura B: Thomas H.W. 2011)

Em contraste com a situação exemplificada na Figura 3A, segue na Figura 3B um exemplo de um abrigo com a fundação do marco geodésico que atende muito bem com relação a estabilidade, proteção solar, segurança e visibilidade.

Outro fator a ser considerado nas análises de infraestrutura de instalação desses instrumentos é a suscetibilidade da inclinação da ETR devido a variações de dilatação do dispositivo de centragem forçada que fixa o equipamento no monumento de concreto e a possibilidade de movimentação da própria estrutura do monumento. Um exemplo dessa influência em relação às variações encontradas ao longo de um ano é o demonstrado na Figura 4. Nela, é possível observar os impactos causados pela inclinação da ETR em Transverse Tilt ao compará-lo aos vetores 2D com média diária (não móvel):

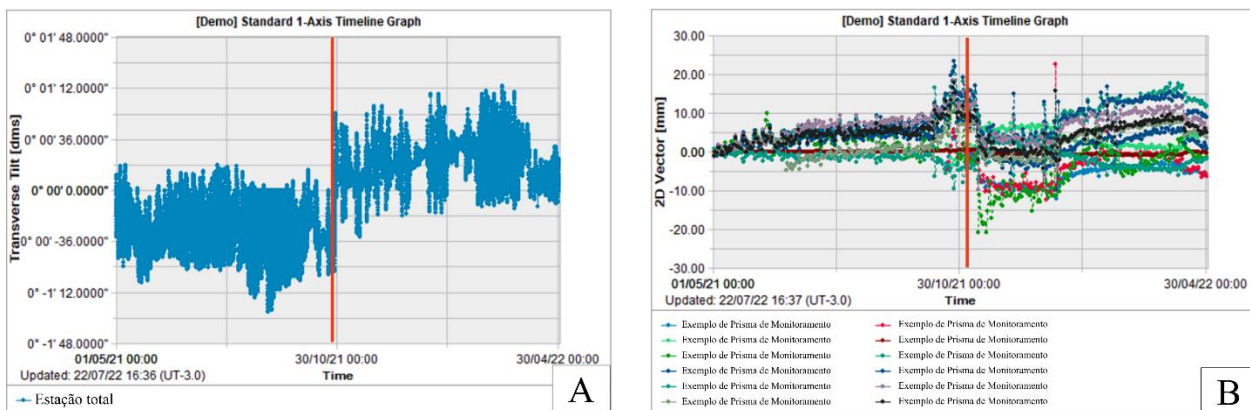


Figura 4 – Gráficos de *Transverse Tilt* (Nível transversal), Figura A, e *Vector 2D* de prismas de monitoramento de um sistema de monitorado por uma TM50, Figura B, impactados pelo desnivelamento do equipamento indicado através de uma linha vertical em vermelho na figura. (Fonte: Vale & Hexagon)

No caso mencionado na Figura 4, houve apenas um evento significativo de desnivelamento do instrumento, ocorrido por volta do dia 30/10/2021. No entanto, em situações mais extremas, em que a variação angular no nivelamento do equipamento excede 3' 48", limite padrão estabelecido pelo software, é necessário solicitar suporte de campo para nivelar o instrumento. Caso contrário, o sistema coletará distâncias enviesadas pelo movimento de inclinação da estação, ou poderá até mesmo parar de realizar qualquer leitura.

Em casos de movimentação constante, esse procedimento pode ser realizado várias vezes ao longo dos meses de monitoramento. A Figura 5 ilustra a leitura de um instrumento instalado sobre um aterro, onde o deslocamento da região causou um grande desnivelamento do equipamento, exigindo que fosse nivelado no campo três vezes ao longo de três meses (indicado através de uma linha vertical em vermelho na figura 5).

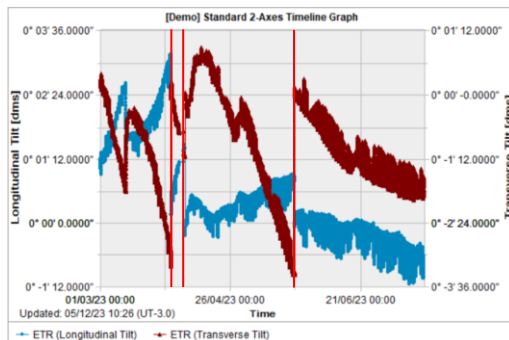


Figura 5 – Gráficos de *Longitudinal and Transverse Tilt* (Nível transversal e longitudinal) impactados pelo desnivelamento do equipamento indicado através das 3 linhas verticais em vermelho na figura. (Fonte: Vale & Hexagon)

4.3 Influência de Condições Atmosféricas

Alterações repentinas na temperatura e pressão podem ter um impacto significativo nos dados capturados pela estação total. Por exemplo, uma variação de apenas 1°C na temperatura pode resultar em uma mudança de 1ppm, equivalente a 1 mm por quilômetro. Supondo que, em um intervalo de 30 minutos, a temperatura mude de 30.3°C para 34.2°C a uma distância de 1km do prisma monitorado. Isso causaria uma variação de aproximadamente 3.9 mm nos dados. Portanto, é crucial sincronizar as medições dos sensores meteorológicos de temperatura ambiente e pressão atmosférica com os ciclos de monitoramento e leitura dos prismas de referência.

Além do cuidado com relação ao tempo de coleta dos dados de temperatura e pressão, deve-se estar atento com a forma e o local de fixação e ou instalação do sensor.

Geralmente, o sensor meteorológico usado para registrar medições de temperatura ambiente e pressão atmosférica fica posicionado dentro dos abrigos ou em proximidade ao telhado de metal dos abrigos, conforme mostrado na Figura 6.



Figura 6 – Exemplo do posicionamento do sensor de temperatura e pressão nos sistemas de monitoramento. (Fonte: Própria do Autor.)

O calor irradiado pela superfície de metal do abrigo ou pela a exposição não protegida do equipamento, terá um efeito sobre a temperatura registrada pelo sensor, pois não será representativo da temperatura ambiente. Como sabemos, a medição de distância da Estação Total é influenciada pela temperatura e pressão. Portanto, é essencial que a correção atmosférica (ppm) aplicada às distâncias medidas represente o mais precisamente possível as condições atmosféricas reais pelas quais as distâncias estão sendo medidas.

Observando a forma de instalação dos sistemas de monitoramento e comparando os dados coletados com outros instrumentos, é possível identificar problemas como este. Um exemplo desta situação aconteceu numa estrutura na qual existia uma estação meteorológica acoplada a um radar terrestre (IBIS-FM) na qual os valores de temperatura registrados estavam na faixa de 18°C a 35°C, gráfico A da Figura 7. Neste mesmo local e intervalo de tempo (de 12/11/2023 até 21/11/2023) existe um estação total robótica cujo sensor de temperatura estava registrando valores na faixa 18°C a 40°C, gráfico B da Figura 7. Após a instalação de um novo abrigo de PVC no dia 24/01/2024, os valores da estação meteorológica do radar estavam na faixa de 18°C a 29°C (gráfico A da Figura 8) dentro do intervalo de 24/01/2024 até 31/01/2024, e as novas temperaturas atingiram valores de 18 a 31°C (gráfico B da Figura 8).

Após a instalação do novo abrigo, os dados de distância inclinada, exemplificados no gráfico B da figura 9, melhoraram consideravelmente. Além disso, como esta variável é utilizada nos cálculos de Cota, Vetor 2D, Vetor 3D, Coordenada Leste, Norte, deslocamento Longitudinal e Transversal, todas essas observações diminuíram suas respectivas amplitudes de variações.

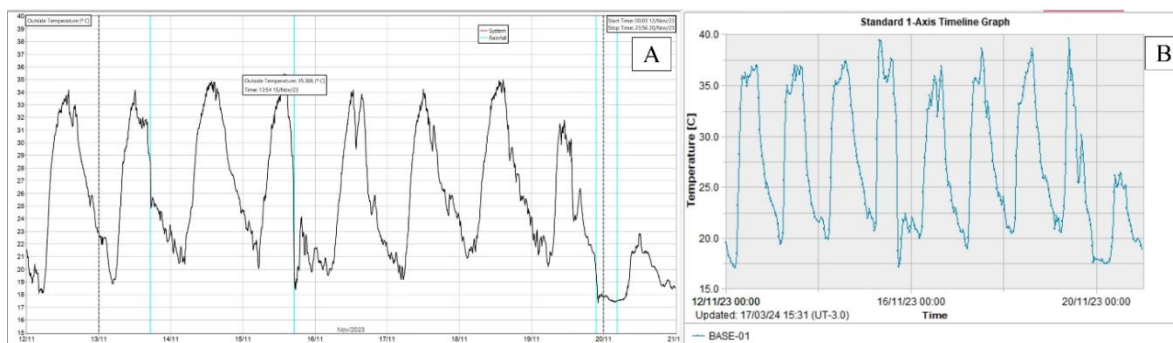


Figura 7 – Gráficos de Temperatura da estação meteorológica acoplada ao radar IBIS-FM (Figura A) e do sensor de temperatura e pressão da estação total robótica (Figura B). (Fonte: Vale & Hexagon)

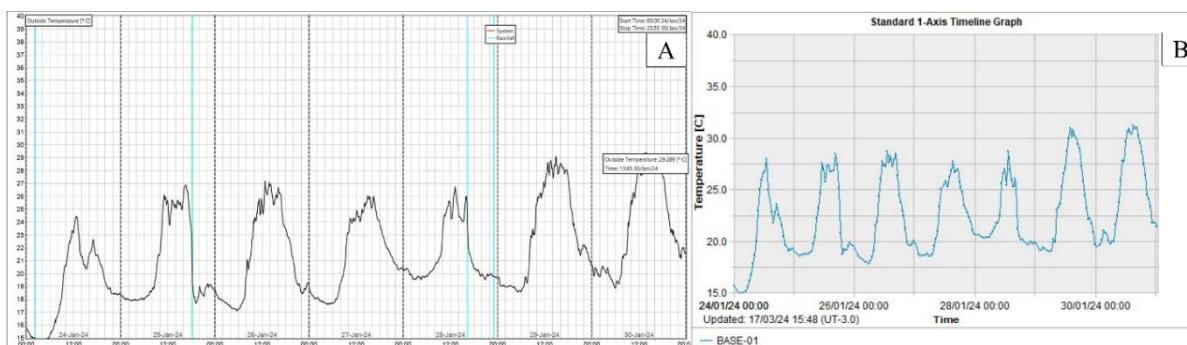


Figura 8 – Gráficos de Temperatura da estação meteorológica acoplada ao radar IBIS-FM (Figura A) e do sensor de temperatura e pressão da estação total robótica (Figura B). (Fonte: Vale & Hexagon)

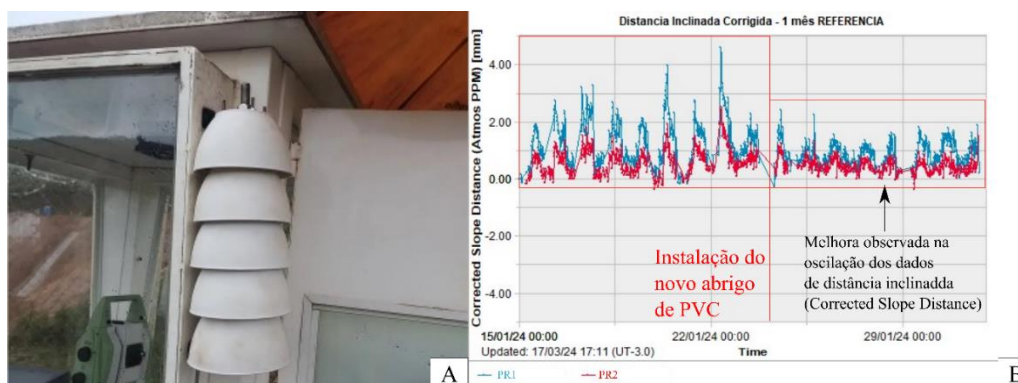


Figura 9 – Exemplo do abrigo feito de PVC para o sensor de temperatura e pressão e gráficos de *Corrected Slope Distance* (Distância Inclinada Corrigida) para os prismas referenciais da estrutura monitorada. (Fonte: Vale & Hexagon)

5 CONCLUSÕES

A confiabilidade de um sistema de monitoramento é fundamental para garantir um acompanhamento preciso e eficaz dos deslocamentos. Dados imprecisos podem levar a decisões equivocadas, impactando desnecessariamente os planos de ação e os custos relacionados à estrutura. Portanto, é essencial distinguir entre movimentações reais e irreais em taludes, o que ressalta a importância da análise criteriosa dos dados, com suporte do histórico de monitoramento e dos prismas de referência.

O propósito deste documento é orientar as equipes na instalação ou manutenção de sistemas de monitoramento de estabilidade de taludes. É crucial que consultores independentes em topografia realizem revisões periódicas desses sistemas para avaliar sua eficácia e garantir conformidade com legislações e procedimentos padrão.

Dentre os principais fatores discutidos neste artigo, destacam-se os seguintes tópicos:

- A precisão no levantamento das coordenadas dos prismas de referência e da base da estação;
- A condição de leitura e posicionamento dos prismas de referência;
- A escolha do local, a visada e a infraestrutura para a instalação do equipamento;
- A influência das condições atmosféricas.

Estes aspectos são cruciais para garantir a eficácia e precisão do sistema de monitoramento automatizado por Estações Totais Robóticas, conforme demonstrado por meio de exemplos e análises de casos práticos no contexto da mineração.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a VALE S.A, ao Centro de Monitoramento Geotécnico do Corredor Sul – VALE e a Hexagon pelo apoio para a publicação deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afeni, Thomas Busuyi; Cawood, Frederick Thomas. *Slope monitoring using total station: what are the challenges and how should these be mitigated?*. South African Journal of Geomatics, v. 2, n. 1, p. 41-53, 2013.
- Crosta, G.B., Frattini, P., Castellanza, R., Frigerio, G., Di Prisco, C., Volpi, G., De Caro, M., Cancelli, P., Tamburini, A., Alberto, W., Bertolo, D., 2015. Investigation, monitoring and modelling of a rapidly evolving rockslide: The Mt. de la Saxe case study. In: Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2. Landslide Processes. Springer International Publishing, pp. 349–354. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_54.
- FUKUZONO, Teruki. A method to predict the time of slope failure caused by rainfall using the inverse number of velocity of surface displacement. Landslides, v. 22, n. 2, p. 8-13_1, 1985.
- Giordan, D., Allasia, P., Manconi, A., Baldo, M., Santangelo, M., Cardinali, M., Corazza, A., Albanese, V., Lollino, G., Guzzetti, F., 2013. *Morphological and kinematic evolution of a large earthflow: the Montaguto landslide, southern Italy*. Geomorphology 187, 61–79. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.035>.
- Giordan, D., Wrzesniak, A., Allasia, P., 2019. *The importance of a dedicated monitoring solution and communication strategy for an effective management of complex active landslides in urbanized areas*. Sustain. 11, 946. <https://doi.org/10.3390/su11040946>
- Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., Casagli, N., 2012. *Design and implementation of a landslide early warning system*. Eng. Geol. 147–148, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.017>.
- Intrieri, E., Carla, T., Gigli, G., 2019. *Forecasting the time of failure of landslides at slope scale: a literature review*. Earth-Sci. Rev. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.019>.
- Loew, S., Gschwind, S., Gischig, V., Keller-Signer, A., Valenti, G., 2017. *Monitoring and early warning of the 2012 Preonzo catastrophic rock slope failure*. Landslides 14, 141–154. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0701-y>.
- Segalini, A., Valletta, A., Carri, A., 2018. *Landslide time-of-failure forecast and alert threshold assessment: a generalized criterion*. Eng. Geol. 245, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.003>.
- Sharon, R; Eberhardt, E (Ed.). *Guidelines for Slope Performance Monitoring*. Csiro Publishing, 2020.
- Thomas H.W. (2011). *Slope stability monitoring: a guide for practicing mine surveyors*. Research Project submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment. University of the Witwatersrand, South Africa.
- Thompson C. (2005). *Importance of Good-Quality Surveying Control Network in an Automated Slope Stability Monitoring Programme*. Circular. Geosystems Africa.