



Técnicas de Monitoramento de Deslocamentos Superficiais em Taludes de Mineração

Danielle Eva Barbosa

Analista, Vale, Belo Horizonte, Brasil, danielle_24barbosa@hotmail.com

Victoria Basileu de Oliveira lima

Geologa Senior, Vale, Belo Horizonte, Brasil, victoria.basileu@vale.com

Anna Letícia da Mata Araújo

Analista, Progen, Belo Horizonte, Brasil, eng.annaaraujo@gmail.com

Ticiane Schivittez Elacoste

Professora e Pesquisadora, CEFET-MG, Araxá, Brasil, ticiane_rg@hotmail.com

Thiago Bomjardim Porto

Professor e Pesquisador, CEFET-MG, Araxá, Brasil, thiago.porto@cefetmg.br

RESUMO: O monitoramento geotécnico de deslocamentos superficiais em ativos críticos pode ser realizado por diversas tecnologias. A aplicação eficaz de cada método exige conhecimento técnico para garantir a detecção dos movimentos reais. Este trabalho avalia dados de deslocamentos superficiais obtidos por Interferometria SAR baseada em satélite (InSAR), Estações Totais Robóticas (ETR) e Radar Interferométrico Terrestre (GB-InSAR) em um estudo de caso com deslocamentos conhecidos e mapeados em campo. O estudo foi conduzido em uma cava de mineração de minério de ferro, localizada em Nova Lima, Minas Gerais. A área analisada inclui um talude de mineração de interesse geotécnico, com histórico de movimentações superficiais. O objetivo é identificar as principais vantagens e desvantagens de cada técnica no contexto do local estudado. Os resultados indicam que o InSAR se mostrou eficaz para o monitoramento de tendências de longo prazo (ao longo de anos). Em contrapartida, o GB-InSAR demonstrou eficiência no monitoramento de curto prazo e a Estação total robótica (ETR) de médio prazo, capturando rapidamente deslocamentos associados a variações sazonais e observou-se uma boa correlação entre as três tecnologias, evidenciando sua complementaridade e reforçando a confiabilidade dos dados obtidos. Contudo, neste estudo, não foi possível estabelecer uma correlação consistente entre os dados de GB-InSAR e InSAR no longo prazo. A ETR posicionou-se como uma ferramenta intermediária, útil para investigações de curto e longo prazo, mas com a limitação intrínseca de fornecer dados pontuais, restritos às localizações dos prismas instalados.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento Geotécnico, Talude de Mineração, Deslocamentos Superficiais, Monitoramento Remoto, ativos críticos.

ABSTRACT: Geotechnical monitoring of surface displacements in critical assets can be performed using various technologies. Effective application of each method requires technical expertise to ensure detection of actual movements. This paper evaluates and compares surface displacement data obtained by satellite-based SAR interferometry (InSAR), Robotic Total Stations, and Ground-Based Interferometric Radar (GB-InSAR) in a case study with known displacements mapped in the field. The study was conducted in an iron ore mining pit located in Nova Lima, Minas Gerais. The tested area includes a mining slope of geotechnical interest, with a history of surface movements. The objective is to identify the main advantages and disadvantages of each technique in the context of the studied site. The results indicate that InSAR proved effective for monitoring long-term trends (over years). In contrast, GB-InSAR demonstrated efficiency in short-term monitoring and the Robotic Total Station in medium-term monitoring, quickly capturing displacements associated with seasonal variations. Good visualization was observed between the three technologies, highlighting their complementarity and reinforcing the reliability of the data obtained. However, in this study, it was not possible to establish a consistent representation between GB-InSAR and InSAR data over the long term. RTS positioned itself as an interesting tool, useful for short- and long-term investigations, but with the intrinsic limitations of providing point-in-time data, restricted to the locations of the installed prisms.

KEYWORDS: Geotechnical Monitoring, Slope, Surface Displacements, Remote Monitoring, Critical Assets.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de deslocamentos em taludes na mineração é uma prática essencial para o acompanhamento de movimentações superficiais, uma vez que permite a detecção precoce de instabilidades e, consequentemente, contribui diretamente para a segurança operacional e a adoção de medidas preventivas eficazes (SHARON; EBERHARDT, 2024). Taludes instáveis podem evoluir por distintos mecanismos de ruptura, como deslizamentos planares, circulares, em cunha ou rupturas estruturais complexas, sendo a identificação e monitoramento desses processos dependentes da observação contínua e precisa das deformações na superfície do maciço. A aplicação de tecnologias e métodos confiáveis de instrumentação, sensoramento e análise de dados é fundamental para garantir a eficácia do monitoramento geotécnico (SHARON; EBERHARDT, 2024).

Atualmente, diversos métodos estão disponíveis para o monitoramento geotécnico, desde técnicas convencionais, como marcos topográficos e prismas refletivos, até tecnologias avançadas, como a interferometria por radar interferométrico de abertura sintética (InSAR), o radar de abertura sintética de base terrestre (GB-Radar) e as estações totais robóticas (NGI, 2013; TARCHI *et al.*, 2003; LAHMY *et al.*, 2019). Conforme Sharon e Eberhardt (2024), cada sistema apresenta particularidades quanto à resolução espacial e temporal, alcance, sensibilidade a fatores ambientais e custo, o que demanda uma análise criteriosa para sua correta aplicação.

A escolha da técnica de monitoramento mais adequada deve considerar não apenas a natureza geológica e geomorfológica do maciço geotécnico, mas também as condições operacionais da mina e o tipo de instabilidade predominante. A adoção de tecnologias incompatíveis com os mecanismos de ruptura — que podem incluir deslizamentos planares, circulares, em cunha ou rupturas estruturais complexas (HOEK; BRAY, 1981; WYLIE; MAH, 2004) — pode comprometer a eficácia dos sistemas de alerta, prejudicando a tomada de decisão em situações críticas (SHARON; EBERHARDT, 2024; FERRERO *et al.*, 2009).

O objetivo do presente estudo é analisar a aplicação de diferentes técnicas de monitoramento de deslocamentos superficiais em taludes de mineração, focando em mecanismos de ruptura ativos e conhecidos, tais como os mencionados acima.

Diante disso, torna-se imprescindível o aprimoramento dos métodos de monitoramento geotécnico, bem como a ampliação do conhecimento técnico-científico sobre os critérios que orientam sua aplicação. Estudos que promovem a compatibilidade entre as tecnologias adotadas e os processos de instabilização observados contribuem para o desenvolvimento de planos de monitoramento mais eficientes, seguros e sustentáveis (SHARON; EBERHARDT, 2024; BARLA; ANTOLINI; OGGERO, 2016; FERRERO *et al.*, 2009).

2 ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS SUPERFICIAIS

O monitoramento de deslocamentos superficiais é fundamental para a detecção precoce de instabilidades em áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa ou mecanismos de ruptura ativos, os quais demandam acompanhamento contínuo e de alta precisão (SHARON; EBERHARDT, 2024; FERRERO *et al.*, 2009). Atualmente, diversas tecnologias estão disponíveis para esse fim, variando em termos de resolução temporal e espacial, custo, alcance e aplicabilidade em diferentes contextos geotécnicos e geográficos (ANTONELLO *et al.*, 2004).

Neste estudo, são comparadas três metodologias amplamente utilizadas no monitoramento de deslocamentos: a Estação Total Robótica (ETR), a Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR) e o Radar de Base Terrestre (GB-Radar). Cada tecnologia é apresentada com suas principais características, vantagens e limitações, com o objetivo de avaliar sua eficiência e complementaridade na análise de deslocamentos superficiais em taludes de mineração (SHARON; EBERHARDT, 2024).

2.1 Estação Total Robótica

A ETR (Figura 1) é um instrumento optico-eletrônico utilizado para medições topográficas e geodésicas com elevado grau de automação. Seu funcionamento baseia-se na combinação entre um teodolito eletrônico e um medidor eletrônico de distancias (EDM), controlados por um sistema embarcado com interface digital. Um dos princípios fundamentais é a medição de ângulos horizontais e verticais, associada a determinação da distância entre o equipamento e o alvo (geralmente um prisma refletor), utilizando feixes de luz modulada ou

laser (SCHOFIELD; BREACH, 2007). Em estações robóticas, o diferencial está na capacidade de rastreamento e apontamento automáticos do prisma, o que permite a conectividade para que os dados sejam acessados remotamente. Esse processo é viabilizado por motores internos que giram o equipamento automaticamente, bem como sensores óticos que detectam o reflexo do prisma. A integração com controladores remotos ou *tablets* possibilita a coleta e armazenamento de dados em tempo real, além da execução de rotinas complexas, como levantamentos em tempo contínuo ou medições repetitivas para monitoramento (TRIMBLE, 2020).

As aplicações da estação total robótica abrangem diversos campos da engenharia e geociências. Na engenharia civil, é amplamente utilizada em locações de obras, controle de deformações, acompanhamento de movimentações estruturais e monitoramento geotécnico de encostas e taludes. No planejamento urbano, é aplicada em levantamentos cadastrais, atualização de mapas e projetos de infraestrutura urbana. Na mineração e na geotecnia é empregada em monitoramentos automatizados de barragens, escavações e estruturas de contenção, permitindo a obtenção de dados em alta frequência com precisão milimétrica (LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2015).

Entre suas principais vantagens destacam-se a precisão, a possibilidade de operação automática e a rápida aquisição de dados em ambientes controlados. No entanto, sua aplicação é limitada pela necessidade de visada direta, sensibilidade a condições atmosféricas (neblina, chuva) e pelo número reduzido de pontos monitorados simultaneamente (ANTONELLO *et al.*, 2004; SHARON; EBERHARDT, 2024).



Figura 1: Imagem ilustrativa da ETR Trimble

(Fonte: <https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/trimble-s9>)

2.2 InSAR

O InSAR ilustrado na Figura 2 é uma técnica de sensoriamento remoto que permite a medição de deslocamentos superficiais milimétricos por meio da interferência entre imagens SAR adquiridas em diferentes épocas (FERRETTI *et al.*, 2007). Seu princípio básico é detectar variações de fase do sinal refletido para estimar deslocamentos verticais ou horizontais. Uma das principais vantagens do InSAR é a capacidade de cobrir grandes áreas com alta resolução espacial, sem necessidade de acesso físico ao terreno, tornando-o útil em zonas de difícil acesso ou com restrições de segurança. Técnicas como Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) e Small Baseline Subset (SBAS) aumentam a confiabilidade dos dados ao reduzir interferências atmosféricas e ruídos de decorrelation (HANSSEN, 2001). As aplicações do InSAR incluem monitoramento urbano de subsidência, deformações em barragens, instabilidades em taludes, deslocamentos em mineração, vulcanologia e geodinâmica. Por sua capacidade orbital e histórico de análise retroativa, é amplamente usado em diagnósticos prévios de áreas com instabilidade geotécnica. Na interpretação, em órbitas ascendentes e descendentes, valores positivos indicam movimento em direção ao sensor (aproximação), negativos indicam afastamento. E-W positivo corresponde a movimento para leste, negativo para oeste; vertical positivo indica levantamento e negativo indica subsidência. Entretanto, o InSAR é sensível à coerência do sinal radar, que pode ser prejudicada por vegetação densa, movimentações rápidas ou alterações abruptas na superfície. Além disso, fatores atmosféricos e geométricos podem introduzir ruídos nos dados, exigindo técnicas avançadas de correção (HANSSEN, 2001).



Figura 2: Imagem ilustrativa InSAR

(fonte: <https://www.groundprobe.com/pt-pt/product/insar-service/>)

2.3 GBRadar

O Ground-Based Radar (GBRadar), também conhecido como radar de abertura sintética terrestre (GB-SAR), ilustrado na Figura 3, é uma tecnologia que aplica os mesmos princípios do SAR em uma plataforma estacionária no solo. O equipamento emite sinais de micro-ondas em direção a uma área de interesse e registra os sinais refletidos, construindo imagens interferométricas que permitem monitorar deslocamentos com precisão milimétrica ao longo do tempo (ANTONELLO *et al.*, 2004). Entre suas principais características, destacam-se a alta taxa de aquisição temporal (de minutos a segundos), elevada precisão na detecção de movimentos e capacidade de operação contínua, independentemente das condições meteorológicas ou luminosas. O GBRadar é ideal para o monitoramento de áreas com instabilidade, sendo comumente instalado em frente a taludes, encostas, barragens e estruturas urbanas críticas (SHARON & EBERHARDT, 2024). Sua aplicação tem se tornado cada vez mais comum no monitoramento de taludes rodoviários e ferroviários, escavações profundas em áreas urbanas, barragens de rejeito e estruturas em processo de recalque ou deformação. Além disso, por gerar dados em tempo real, é considerado um sistema essencial em planos de emergência para evacuação e gestão de instabilidades geotécnicas (BOVENGA *et al.*, 2012).

O radar IBIS-FM, desenvolvido pela IDS GeoRadar (Leica Geosystems), utiliza tecnologia Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) para monitoramento geotécnico. Instalado com vista direta para o talude monitorado nesta pesquisa, o sistema realiza varreduras rápidas com intervalo de cerca de dois minutos, o que possibilita a detecção de deslocamentos com sensibilidade milimétrica ao longo da linha de visada (LOS – Line of Sight) e alta resolução temporal. Essa capacidade de aquisição quase em tempo real permite identificar movimentos acelerados, funcionando como um sistema eficaz de alerta antecipado para instabilidades (SHARON & EBERHARDT, 2024).

Estudos práticos demonstram que, sob condições favoráveis, como a ausência de vegetação e geometria adequada da área de monitoramento, o IBIS-FM apresenta desempenho consistente tanto para análises de curto quanto de longo prazo (ANTONELLO *et al.*, 2004). Ademais, sua utilização tem sido fundamental em planos de emergência, possibilitando respostas rápidas a variações repentinas no comportamento de taludes, barragens e estruturas críticas (BOVENGA *et al.*, 2012).



Figura 3: : Imagem ilustrativa do IBIS_FM

(fonte: <https://www.accurate.kiwi/Product/gpr-ids-ibis-fl/>)

3 ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi conduzido em um talude com concreto projetado, localizado em uma cava de mineração a céu aberto (Figura 4), que apresenta movimentações superficiais recorrentes. O maciço é constituído predominantemente por rochas metavulcânicas, submetidas a processos de intemperismo e alterações estruturais ao longo do tempo. A área está inserida no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero (QF), situado na porção sul do estado de Minas Gerais. O QF compõe uma das mais importantes províncias minerais do Brasil, integrando o Cráton do São Francisco e abrigando seções representativas do embasamento arqueano, além das sucessões paleoproterozóicas Minas e Itacolomi (DORR, 1969; RINGER *et al.*, 1995; HEILBRON *et al.*, 2016).

No contexto específico da mina estudada, a extração de minério de ferro ocorre predominantemente nas unidades ferríferas da Formação Cauê, pertencente ao Grupo Itabira. Essas unidades são compostas por hematitas compactas, médias e moles, além de itabiritos ricos em sílica, com variações entre material compacto, médio e mole. As hematitas compactas dominam a região central da cava, estando circundadas por materiais de menor resistência, como hematitas moles e itabiritos retrabalhados.

Com base em inspeções de campo e no histórico de eventos registrados, verificou-se que os processos de instabilidade, incluindo erosões regressivas e rupturas localizadas. A escolha do talude para aplicação comparativa das tecnologias de monitoramento deve-se à sua alta frequência de movimentações detectadas e à favorável refletividade para medições remotas, sendo uma área com visibilidade adequada para os três equipamentos empregados neste estudo: ETR, InSAR e GB-SAR. A topografia e a geometria do talude permitiram a instalação e o uso simultâneo das três tecnologias, viabilizando uma análise integrada e comparativa dos resultados obtidos.

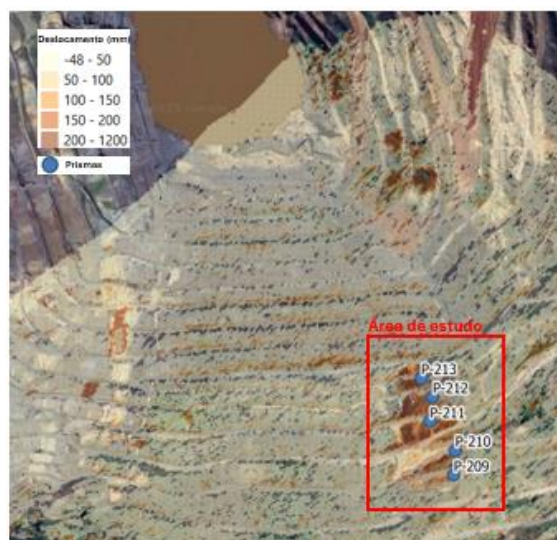


Figura 4: Área monitorada do talude com concreto projetado

4 METODOLOGIA

Para o monitoramento e análise da estabilidade de um talude localizado em uma cava de mineração a céu aberto, foram empregadas três tecnologias principais de monitoramento superficial: GBradar, modelo: IBIS FM, ETR, modelo: S9 e InSAR. O objetivo da aplicação combinada dessas ferramentas foi observar o comportamento dos dados de diferentes resoluções temporais em um intervalo de tempo com deslocamentos mapeados.

Complementando o monitoramento contínuo do radar, foi utilizada uma estação total robótica da empresa Trimble, equipada com quatro prismas posicionados em pontos estratégicos do talude, capazes de abranger toda a sua extensão. O sistema realiza leituras automáticas a cada 30 minutos, fornecendo medições precisas de deslocamento tridimensional (X, Y, Z). Por meio da ETR, é possível acompanhar a evolução de movimentações pontuais ao longo do tempo, sendo especialmente eficaz na detecção de deslocamentos graduais e tendências de instabilidade em médio e longo prazo.



Além disso, foram incorporados dados orbitais provenientes da técnica inSAR, especificamente utilizando informações provenientes da órbita vertical.

O período analisado corresponde aos meses de dezembro de 2024 a maio de 2025, abrangendo o período chuvoso do local onde foi mapeado um deslocamento real em campo. Nesse intervalo, foram geradas séries temporais integradas a partir das três tecnologias com o parametro vertical para ETR, deslocamento na linha de visada (LOS) para GBradar e vertical para o inSAR, que permite a comparação e validação cruzada dos dados obtidos. A integração metodológica possibilitou uma análise mais robusta do comportamento do talude, combinando precisão espacial, frequência de coleta e abrangência de cobertura, contribuindo para uma avaliação mais confiável das dinâmicas de deslocamento superficial.

5 RESULTADOS

Foi realizada uma análise comparativa entre diferentes tecnologias de monitoramento no período de novembro de 2024 a junho de 2025, considerado o intervalo mais crítico para o talude em estudo. As comparações abrangeram os dados obtidos entre as tecnologias ETR x GB-Radar e ETR x InSAR.

Nas Figuras 5 e 6, apresenta-se a comparação entre as séries temporais de deslocamento da Linha de Visada (LOS) do GB-Radar e da distância inclinada (slope distance) obtida por quatro prismas da ETR. Ambos os sensores indicam deslocamentos positivos, representando movimentação do maciço em direção aos sensores, ou seja, em direção ao fundo da cava. Apesar de apresentarem magnitudes distintas, com os prismas registrando deslocamentos de até 120 mm e o radar chegando a 130 mm, observa-se um comportamento semelhante nas tendências. As diferenças nos valores podem estar relacionadas à maior suscetibilidade do radar a incrementos de falsos deslocamentos, que são inerentes a tecnologia do radar, grande parte, a interferências ambientais e reflexões falsos, que comprometem a qualidade do sinal.

A partir da avaliação dos parâmetros de deslocamento, constatou-se a ocorrência de movimento real no talude, evidenciado de forma consistente por todas as tecnologias analisadas. Ressalta-se que os equipamentos de GB-Radar e ETR estão posicionados na mesma praça, garantindo uma visada equivalente do talude, o que fortalece a correlação dos dados.

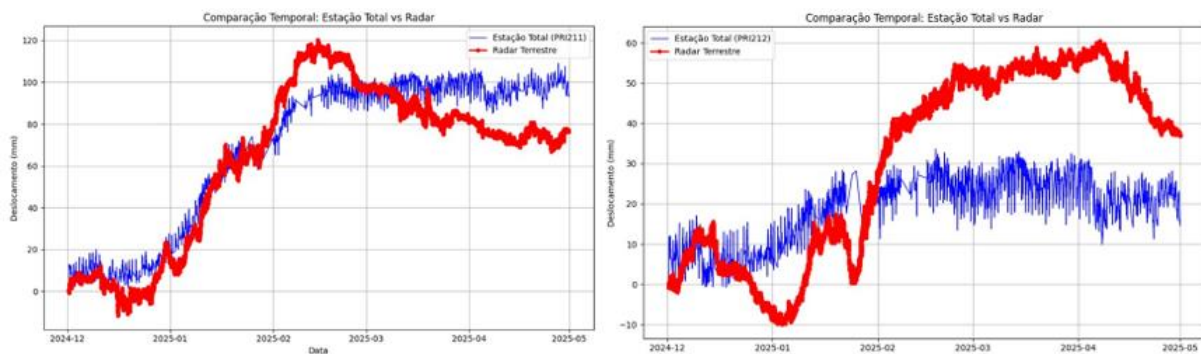


Figura 5: Comparação temporal - Estação total vs Radar

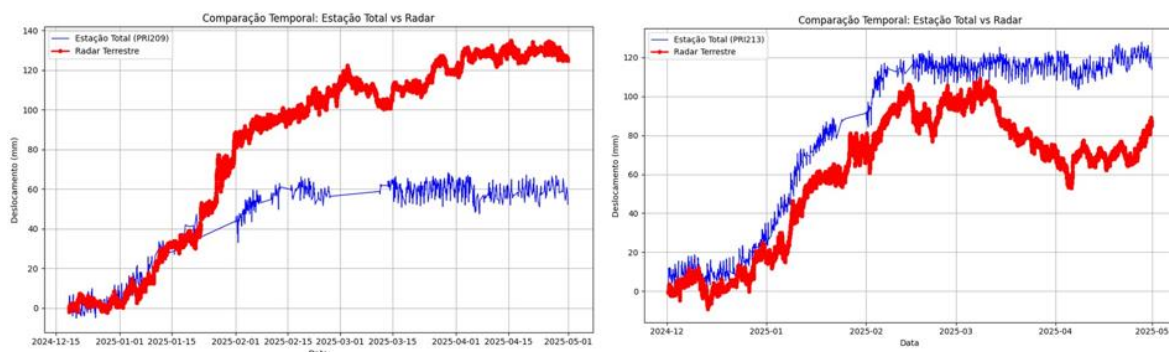


Figura 6: Comparação temporal - Estação total vs Radar

As Figuras 7 e 8 apresentam a comparação das séries temporais dos deslocamentos verticais registrados pelos prismas da ETR e pelos dados do InSAR. Os valores negativos da ETR indicam aproximação em relação

ao sensor, enquanto os do InSAR refletem deslocamentos verticais descendentes. Ambos os conjuntos de dados apontam para recalque do talude, com magnitude aproximada de 40 mm, essa amplitude se dar pela distância entre o talude e o equipamento. A diferença na resolução temporal é de 30 minutos para a ETR e cerca de 7 dias para o InSAR, que corresponde a característica de cada tecnologia. Apesar da diferença entre a frequência de aquisição, os dados convergem na indicação de instabilidade vertical na área monitorada.

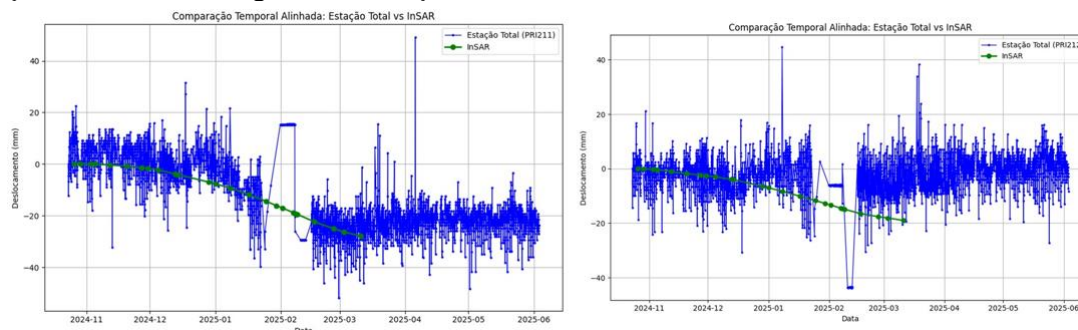


Figura 7: Comparação temporal - Estação total vs InSAR

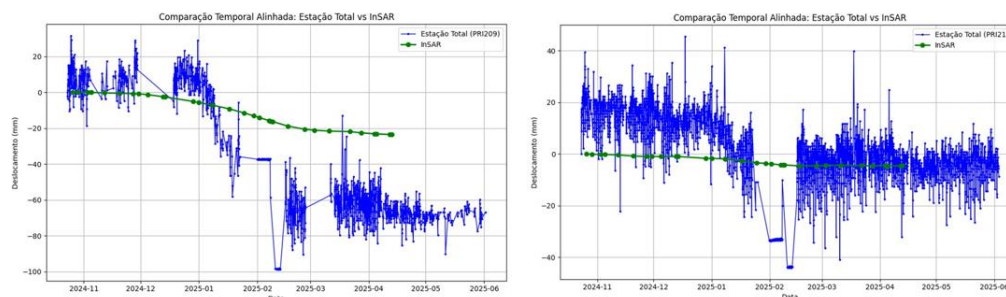


Figura 8: Comparação temporal - Estação total vs InSAR

6 Considerações Finais

A análise integrada das tecnologias de monitoramento geotécnico ETR, GB-SAR e InSAR aplicada a um talude com histórico de instabilidade em ambiente de mineração a céu aberto, demonstrou elevada complementaridade entre os métodos, tanto em termos de resolução espacial e temporal quanto na robustez dos dados obtidos.

Os resultados confirmam a ocorrência de deslocamentos reais no talude monitorado, validados de forma consistente pelas três tecnologias. Embora haja variações nas magnitudes registradas, os dados apresentaram coerência na direção dos movimentos, com recalque do terreno em direção ao fundo da cava. A correlação entre os sensores reforça a confiabilidade do monitoramento integrado e a eficácia da abordagem multitécnica na identificação e caracterização de instabilidades.

A ETR demonstrou elevada precisão na detecção de deslocamentos pontuais e contínuos, sendo eficaz na identificação de tendências de instabilidade em médio e longo prazo. O GB-SAR destacou-se pela alta resolução temporal. O InSAR orbital, por sua vez, contribuiu com ampla cobertura espacial e densidade de pontos de medição, permitindo a análise de padrões regionais de deformação, ainda que com menor frequência de aquisição. A integração metodológica adotada neste estudo permitiu a compensação das limitações inerentes a cada técnica individual, resultando em uma avaliação mais abrangente e confiável do comportamento do talude. Tal abordagem reforça a importância da seleção criteriosa de tecnologias de monitoramento com base nas características geomorfológicas, geológicas e operacionais do local, bem como no mecanismo de ruptura predominante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONELLO, G.; CASAGLI, N.; FARINA, P.; LEVA, D.; NICO, G.; SIEBER, A.; TARCHI, D. Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements. *Landslides*, v. 1, p. 21–28, 2004.



BARLA, G.; ANTOLINI, F.; OGGERO, M. Integration of radar and classical monitoring data in slope stability analysis. *Engineering Geology for Society and Territory*, v. 2, p. 1107–1110, 2016.

BOVENGA, F. *et al.* *Advanced radar technologies for monitoring civil infrastructures*. Remote Sensing, Basel, v. 4, n. 6, p. 1404–1431, 2012.

DORR, J. V. N. *Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. U.S. Geological Survey Professional Paper 341–B, 1969.

FERRERO, A. M.; *et al.* (2009). Advanced monitoring for slope stability in open pit mining: a review. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,

FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F.; MASSONNET, D. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA TM-19, 2007.

HANSSEN, R. F. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.

HEILBRON, M. *et al.* The São Francisco Craton and its margins. São Francisco Craton, Eastern Brazil. *Regional Geology Reviews*, Springer, 2016. p. 3–76.

HOEK, E.; BRAY, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*. 3rd ed.

LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. *GPS satellite surveying*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

NGI – Norwegian Geotechnical Institute. *Guidelines for Instrumentation and Monitoring of Landslides and Slopes*. Oslo, 2013.

RENGER, F. E. *et al.* *Structural and geochronological constraints on the evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. *Precambrian Research*, v. 73, n. 1–4, p. 79–94, 1995.

SHARON, Robert; EBERHARDT, Erik (editores). *Guia para Monitoramento de Taludes*. Tradução e publicação pela ABGE, 2024. 367 p.

SCHOFIELD, W.; BREACH, M. *Engineering surveying*. 6. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.

TRIMBLE. *S-Series total stations technical datasheet*. Sunnyvale, CA: Trimble Inc., 2020. Disponível em: <<https://www.trimble.com/>>. Acesso em: 21 maio 2025.

WYLIE, D. C.; MAH, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*.