

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Correlação entre os resultados de monitoramento via Radar de Abertura Sintética Orbital (InSAR) e Estação Total Robótica (ETR)

Pamela Lisboa Ferreira

Engenheira Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, pamela.lisboa.ferreira@vale.com

Beatriz Mapa Clemente

Engenheira Plena, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, beatriz.clemente@vale.com

Eduardo José Diniz

Gerente, Hexagon, Belo Horizonte, Brasil, eduardo.diniz@hexagon.com

Diego Lage

Engenheiro Pleno, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, diego.lage.goncalves@vale.com

Karla Cristina Araujo Pimentel

Coordenadora, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, karla.pimentel@vale.com

RESUMO: O monitoramento de deslocamentos superficiais de barragens no contexto da mineração vem passando por avanços relacionado às tecnologias atualmente empregadas, dentre elas podem-se citar o radar orbital InSAR e a estação total robótica. Ambas tecnologias possuem, dentre outras aplicações, relevância no monitoramento para fins de previsão de comportamento da estrutura ou de progressão de processos de deslocamentos que se desenvolvem a longo prazo. Este artigo apresenta as vantagens e limitações de cada tecnologia e mostra um estudo comparativo de dados de deslocamentos verticais em uma barragem de disposição de rejeitos. Desta forma, pretende-se apresentar a aplicação de uma metodologia que permite a comparação de dados de forma prática, utilizando o software QGIS. Além disso, a metodologia apresentada proporciona a análise da confiabilidade dos dados obtidos por tecnologias diferentes, o que reduz as incertezas nas análises e permite uma maior assertividade na tomada de decisão.

PALAVRAS-CHAVE: Radar Orbital InSAR, Estação Total Robótica, Deslocamento Superficial

ABSTRACT: The monitoring of surface displacements of dams in the context of mining has undergone advances related to the technologies currently used, among them the orbital radar InSAR and the robotic total station can be mentioned. Both technologies have, among other applications, relevance in monitoring for the purpose of predicting the behavior of the structure or the progression of displacement processes that develop over the long term. This article presents the advantages and limitations of each technology and shows a comparative study of vertical displacement data in a tailings dam. In this way, it is intended to present the application of a methodology that allows the comparison of data in a practical way, using QGIS software. In addition, the presented methodology provides an analysis of the reliability of data obtained by the different technologies, which reduces uncertainties in the analyses and allows for greater assertiveness in decision-making.

KEYWORDS: Satellite Radar InSAR, Total Robotic Station, Surface Displacement

1 Introdução

O monitoramento de barragens no contexto da mineração vem utilizando tecnologias antes aplicadas em outros tipos de estruturas como minas a céu aberto e estruturas civis. Dentre as tecnologias mais



promissoras para o monitoramento de deslocamentos superficiais de maneira preditiva (*Early Warning System*) podem-se citar o Radar de Abertura Sintética Orbital (InSAR) e a Estação Total Robótica (ETR).

De acordo com Carlà *et al* (2018), o radar satelital pode ser comumente aplicado a diversas situações relacionadas a movimentos de massa, tais como, mapeamento de deslizamentos, monitoramento, modelagem e, por meio da análise de gráficos deslocamento *versus* tempo, na identificação de alterações nas taxas de deformação.

O radar orbital é capaz de calcular deslocamentos superficiais com acurácia milimétrica baseado na técnica de interferometria. Seu funcionamento consiste na emissão de ondas eletromagnéticas, as quais são refletidas após encontrar algum anteparo na superfície da Terra. Assim, o radar orbital calcula a fase da onda refletida e compara essa com a fase da onda refletida na sua próxima passagem, não requerendo a instalação de refletores físicos no terreno (Carlà *et al.*, 2018). Outra importante característica dessa tecnologia é a realização de medidas na linha de visada (LOS – “Line of Sight”), o que possibilita a detecção apenas de movimentos aproximando ou afastando do radar, logo, as medidas realizadas não são deslocamento absolutos. A Figura 1 ilustra como a medida da diferença de fase é utilizada no cálculo do deslocamento pelo radar orbital.

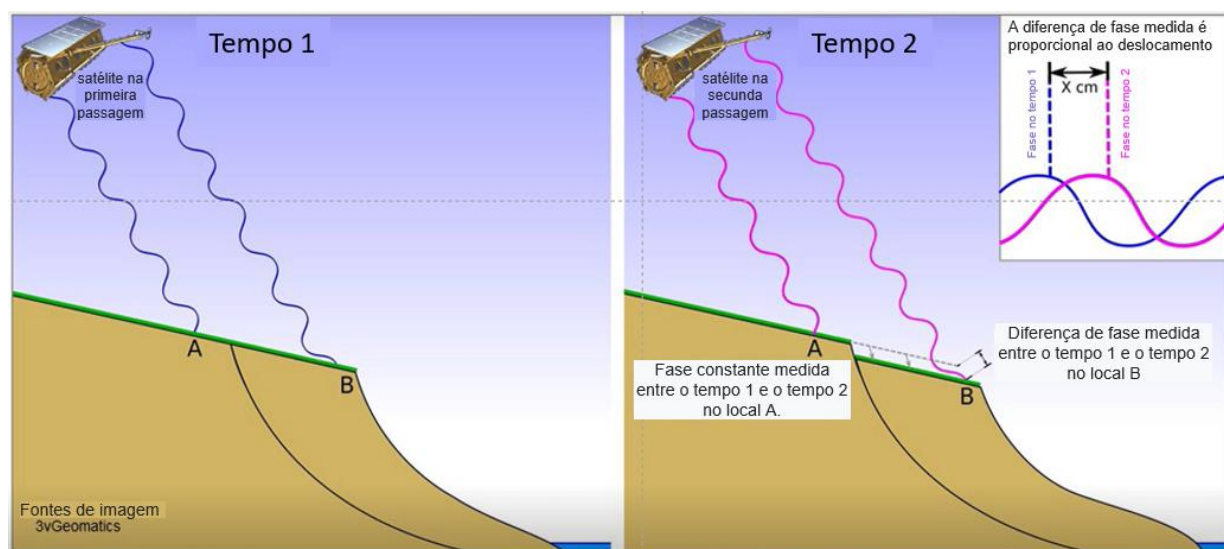


Figura 1. Ilustração da Medida de Deslocamento a partir da Diferença entre Fases das Ondas eletromagnéticas pelo Radar Orbital (Modificado Leighton, J., (2020).

Além das características mencionadas, pode-se citar como vantagens da utilização do radar orbital a possibilidade de cobertura de áreas extensas e áreas com dificuldades de acesso, o potencial para a detecção prévia de deslocamentos lentos e de análises históricas de imagens de satélites, o que permite a análise de deformações superficiais durante longos períodos ou mesmo após a ocorrência de uma ruptura. Por outro lado, as principais limitações correspondem à sensibilidade limitada na direção norte-sul, detecção de movimentos apenas superficiais, problemas para detecção de movimentos rápidos e falta de dados em áreas de produção na mina, devido a alterações na reflectividade (Farina, 2021).

Um mesmo deslocamento superficial pode ser visualizado de formas diferentes pelo InSAR. A Figura 2 mostra as duas possíveis órbitas do radar a saber, ascendente e descendente. Na geometria ascendente, o radar realiza uma órbita do sul para o norte e sua visada esta voltada para leste. Já na geometria descendente, a orbita é de norte para sul e com visada voltada para oeste. Em ambas órbitas, movimentos afastando do radar são expressos com valores negativos e aproximando com valores positivos.

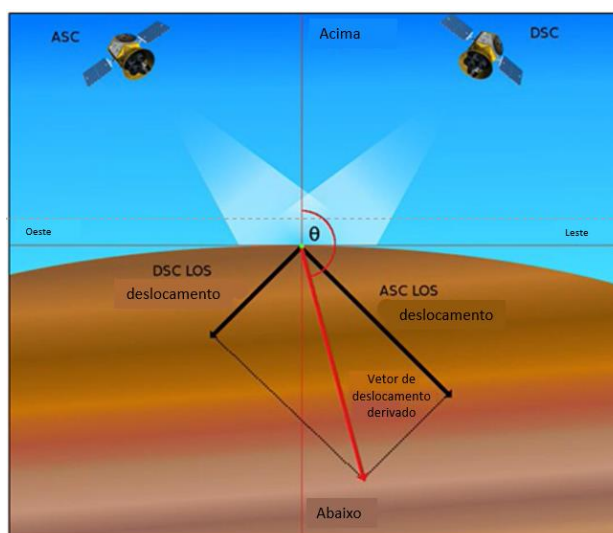


Figura 1. Órbitas Ascendente e Descendente do Radar Orbital (Modificado Leighton, J., (2020).

Em alguns casos, tem-se a cobertura das duas órbitas para um mesmo ponto na superfície do terreno. Quando isso ocorre, é possível realizar uma combinação de vetores e determinar componentes do movimento na direção leste-oeste e na direção vertical. Essa combinação possibilita mensurar deslocamentos absolutos nas direções citadas. A Figura 3 ilustra como essa combinação de vetores é realizada para movimentos verticais, sendo o vetor azul o valor medido para a órbita ascendente, o vetor amarelo o medido para a órbita descendente e o vermelho o vetor calculado (deslocamento vertical resultante). Para a componente de deslocamento vertical, valores negativos indicam recalque e positivos levantamento.

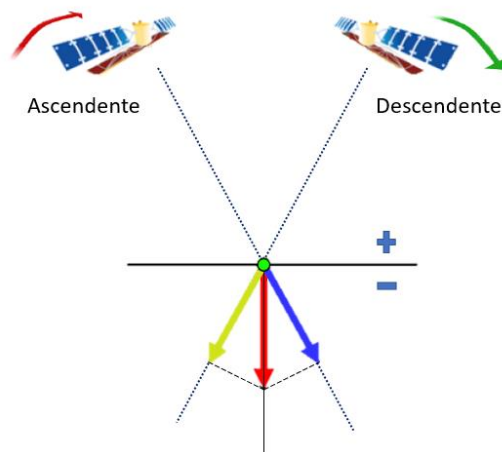


Figura 3. Combinação de Vetores para o Cálculo de Movimento Vertical Absoluto (Farina, 2021).

A Estação Total Robótica (ETR) é um equipamento que realiza leituras de ângulos e distâncias por meio de emissão de ondas ópticas tipo laser (feixe de luz) em prismas de monitoramento e referência. O sistema de monitoramento por estação robótica consiste na construção de um espaço tridimensional para a aquisição de coordenadas esféricas, onde a estação total tem coordenadas conhecidas *a priori* e que pode ser verificada e atualizada usando prismas de referência estável, se necessário.

Os prismas objetos de monitoramento, por sua vez, têm suas coordenadas adquiridas ao longo do tempo (coordenadas *target*), por meio das leituras de ângulos e distâncias, onde é feito o cálculo das coordenadas reais XYZ (leste, norte e cota). Se houver variação entre as coordenadas *target* ao longo do tempo, significa que existe um processo cinemático em progresso, e os vetores de deslocamento podem ser decompostos. Há também a possibilidade da fundação da ETR se mover, o que pode ser checado pelos prismas de referência ou por um sistema de primas sentinelas, se houver. Além disso, na configuração da estação livre, a ETR pode atualizar sua própria posição no espaço, com a correção a partir dos prismas de referência, que evita a



desorientação do equipamento. Por fim, os prismas de referência estável podem corrigir as medidas angulares que a ETR realiza ao longo do tempo, mitigando os erros de metrologia observáveis graficamente.

O cálculo realizado pela ETR para determinar a posição de um ponto é baseado em três equações, onde SD é a distância do ponto, V é o ângulo vertical e Hz é o ângulo horizontal, assim as coordenadas de um prisma, representado na Figura 4 podem ser calculadas da seguinte forma:

$$(1) X = SD \cos(Hz) \sin(V)$$

$$(2) Y = SD \sin(Hz) \sin(V)$$

$$(3) Z = SD \cos(V)$$

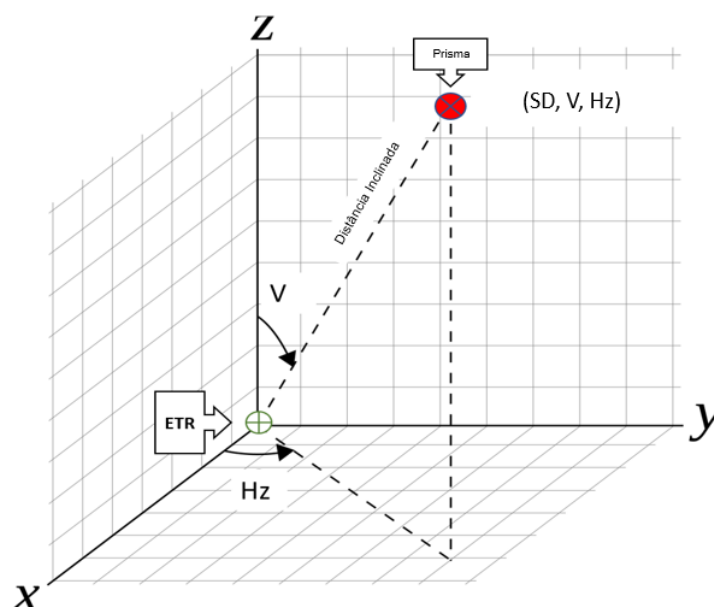


Figura 4. Conversão de Coordenadas Esféricas para UTM

O uso da Estação Total de precisão no processo de monitoramento de estruturas é aplicável em áreas onde deseja-se acompanhar o deslocamento superficial da estrutura. São características deste sistema: precisão submilimétrica, levantamento periódico e técnica bastante efetiva para estimar a geometria do deslocamento de áreas detectado a partir do radar, uma vez que fornece o vetor de deslocamento 3D, enquanto o InSAR são medições de linha de visão que monitoram vetorialmente o deslocamento (Carneiro et.al, 2017)

2 Estudo de caso

Este item apresenta a metodologia utilizada para a realização do estudo e os resultados das análises realizadas para comparação dos dados de InSAR e estação total robótica em uma barragem de disposição de rejeitos de mineração.

2.1 Metodologia

Foi realizada inicialmente a aquisição dos dados de monitoramento brutos, da componente vetorial vertical fornecida pela tecnologia INSAR e dos prismas da ETR para o mesmo período. Posteriormente, foi realizado um ajuste nos dados de ambas as tecnologias, por meio das ferramentas computacionais Excel, QGIS e *software* de gerenciamento do sistema da ETR, de acordo com a disponibilidade de dados fornecida por cada uma, a fim de se obter o mesmo período de análise.



Tal como proposto por Pimentel et al (2021), criou-se um mapa de deslocamentos correlacionando os deslocamentos observados em ambas as tecnologias com a mesma escala de cores (Figura 4.1) para fins de melhor visualização e comparação dos resultados. Em seguida, foram criados gráficos dos dados de monitoramento em função do tempo utilizando o software QGIS e o software do sistema da ETR, e finalmente foi realizada a análise comparativa de valores de deslocamentos verticais resultantes e de tendências observadas, considerando todos os prismas da estrutura e pontos do INSAR localizados próximos a esses prismas, com o objetivo de se verificar a confiabilidade do dado da estação total robótica.

A ETR utilizada para obtenção dos dados estudados neste artigo tem como precisão angular 0,5'' e precisão linear de 0,6 mm + 1 ppm. O sistema de monitoramento desempenhado por ela opera em tempo real 24 horas por dia e com ciclos de leituras de, aproximadamente, 10 minutos.

O radar satelital InSAR do presente estudo utiliza principalmente sensores da constelação COSMO-SkyMed que operam na banda X do espectro eletromagnético, com frequência central de 9,6 GHz, com comprimento de onda de 3,1cm. Os dados de monitoramento InSAR são coletados a cada passagem do sensor sobre determinada área, o que ocorre em um intervalo de cerca de 8 dias. Dentre as diversas técnicas disponíveis para o monitoramento interferométrico via SAR, adota-se a de Persistent Scatterers (PS), pontos coerentes em uma base histórica de vários levantamentos consecutivos.

2.2 Resultados e Discussão

A partir da utilização dos dados de deslocamento vertical da ETR e dos dados de deslocamento vertical do InSAR, foi possível realizar uma comparação dos resultados por meio do *software* QGIS e do sistema da ETR para o mesmo período, apresentada na Figura 5. Observa-se grande similaridade entre os valores de deslocamento vertical obtidos pelas duas tecnologias disponíveis em uma estrutura geotécnica. A magnitude de deslocamento vertical dos prismas diminui à medida que se aproxima da região à jusante da estrutura, o que também pode ser observado pelos dados do InSAR, apresentando recalques em torno de 5 mm a 25 mm, em um período de três meses de monitoramento.

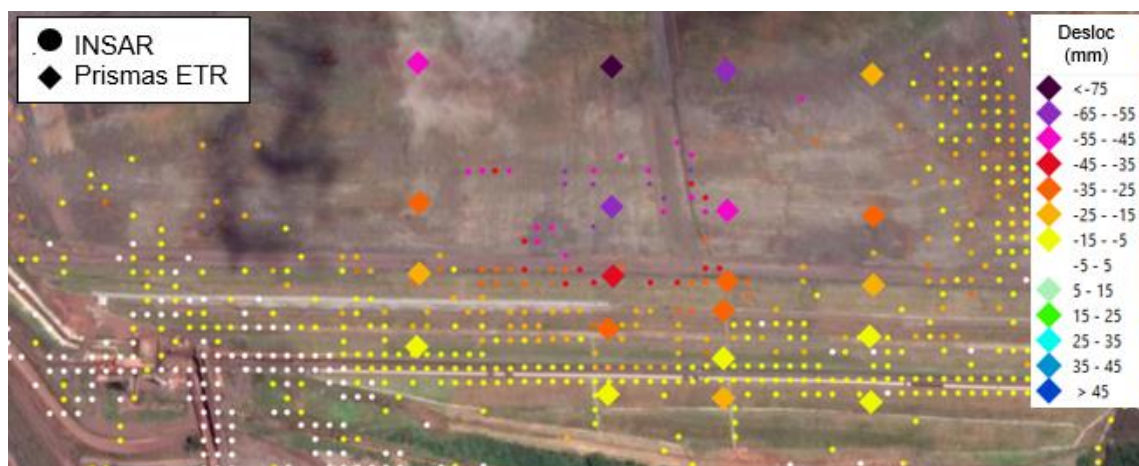


Figura 5. Deslocamento Vertical obtido pelo Levantamento de Radar Orbital e Dados dos Prismas de Monitoramento por Estação Total Robótica.

Com o objetivo de se analisar a correlação entre as tendências apresentadas pelos dados verticais, foi realizada uma comparação detalhada entre os prismas e os pontos recuperados nas proximidades, adequando ambos os dados para o mesmo período e utilizando uma escala similar. Encontrou-se, então, similaridade entre os dados de monitoramento vertical e entre possíveis mudanças de tendências observadas em diferentes prismas e pontos do radar orbital. As Figuras 6 e 7 apresentam essas comparações para 4 prismas selecionados em uma seção da barragem.

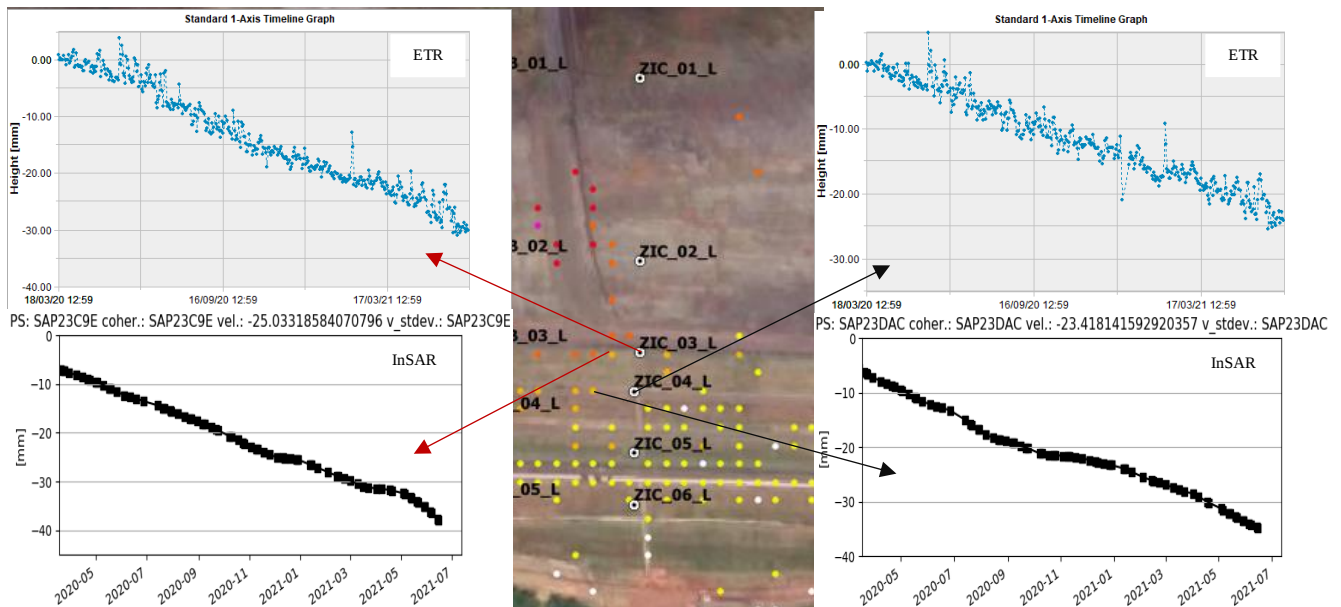


Figura 6. Detalhamento do deslocamento Vertical obtido pelo levantamento orbital e dados dos prismas ZIC_03_L e ZIC_04_L

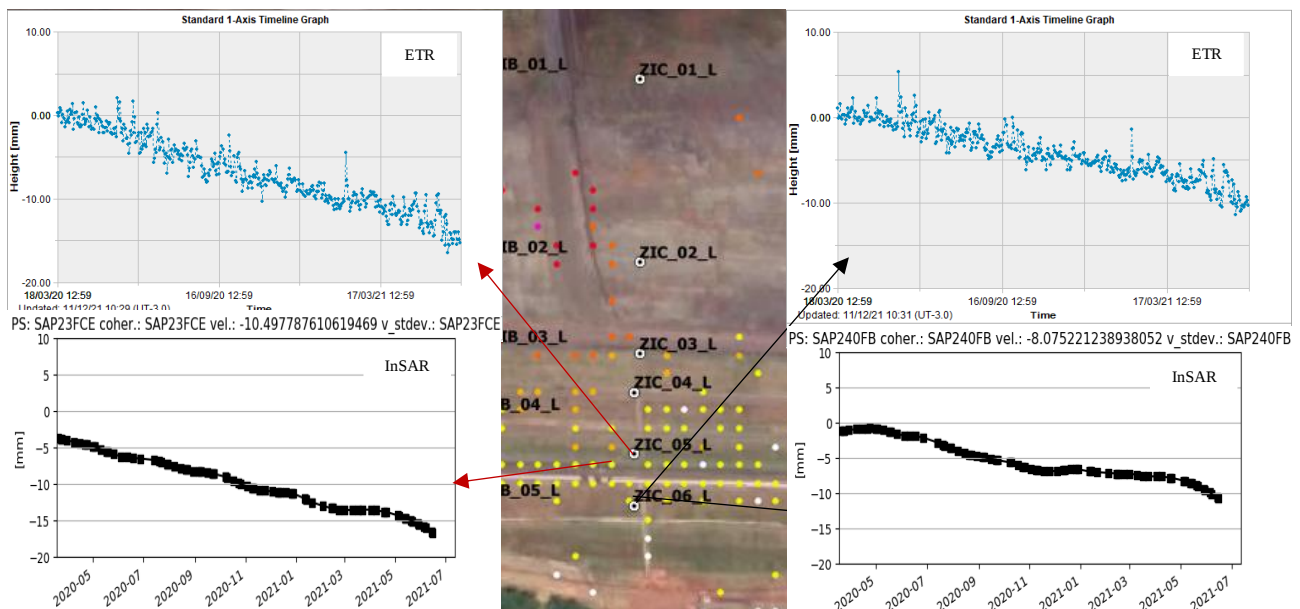


Figura 7. Detalhamento do deslocamento Vertical obtido pelo levantamento orbital e dados dos prismas ZIC_05_L e ZIC_06_L

Nota-se que os o prisma ZIC_03 apresentou deslocamento vertical de aproximadamente 30 mm, similar ao que pode ser visto pelo ponto do InSAR analisado (30mm). Seguindo a mesma metodologia de análise, os prismas ZIB_04, ZIB_05 e ZIB_06 apresentaram deslocamentos verticais próximos a 25 mm, 15 mm e 11 mm respectivamente, enquanto os pontos do InSAR aos quais estão associados apresentaram deslocamentos da ordem de 27 mm, 13,5 mm e 10 mm. De modo geral, os dados brutos acumulados e as tendências observadas confirmaram a confiabilidade dos dados medidos pela ETR e radar orbital.

Considerando que uma estrutura geotécnica pode apresentar mudanças de comportamento que podem estar correlacionadas, por exemplo, com diferentes períodos do ano (chuvoso e de estiagem), foi também observada a semelhança entre possíveis mudanças de tendências nas diferentes tecnologias, tal como mostra a Figura 8.

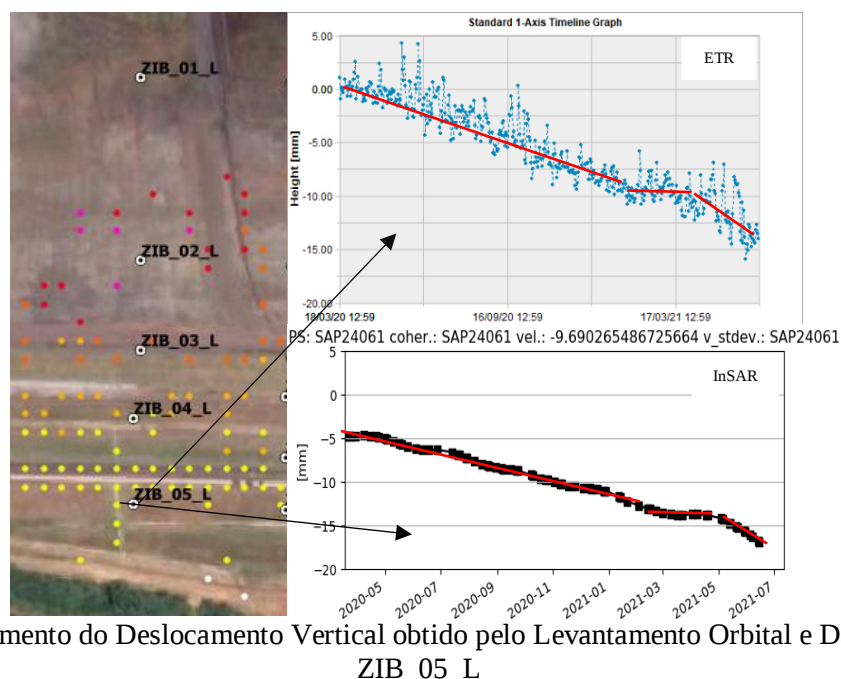


Figura 8. Detalhamento do Deslocamento Vertical obtido pelo Levantamento Orbital e Dados dos Prismas ZIB_05_L

3 Conclusões

Este artigo apresentou a comparação de dados de deslocamento superficial obtidos pelo radar satelital InSAR e pela estação total robótica ETR para uma barragem de disposição de rejeitos de mineração. A análise comparativa de dados entre diferentes tecnologias é uma prática necessária a fim de identificar o grau de confiabilidade dos dados. Foi apresentada a metodologia utilizada para realização dessas comparações por meio da utilização do software QGIS e gráficos de deslocamento *versus* tempo. A partir da obtenção de dados com grande similaridade, seja considerando dados brutos ou a análise de tendência, pode-se então trabalhar com menores incertezas, permitindo a tomada de decisões relacionadas com o desempenho da estrutura de forma mais segura.

De modo geral, o estudo em questão apresentou boa correlação entre os dois sistemas de monitoramento analisados confirmando a qualidade e a confiabilidade dos dados de deslocamentos verticais. Deve-se ressaltar a importância da realização periódica dessas análises, a fim de confirmar que a semelhança dos dados se mantém, ou seja, que não houve mudanças na confiabilidade dos dados de monitoramento utilizados.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carlà, T, Farina, P., Intrieri, E., Ketizmen, H., Casagli, N. (2018). Integration of Ground-Based Radar and Satellite InSAR data for the Analysis of an Unexpected Slope Failure in an Open-Pit Mine. *Engineering Geology* 235 (2018) 39-52.
- Carneiro, S.R., Costa, F.F., Castilho, B.M., Farina, P. (2017). Programa Integrado de Monitoramento de Deformações para Barragens de Rejeitos: O Caso do Complexo de Germano. XXXI - Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGB, 13p.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Farina, P. (2021). Satellite InSAR for Mine Deformation Monitoring. In: Training Course in Company - Vale S.A.
- Leighton, J. (2020). Introduction to Satellite-Based SAR. In: 2020 Radar Monitoring Short Course. Geotechnical Center of Excellence, University of Arizona.
- Pimentel, K., Vasconcelos, I, Mapa, B., Lage, D., Costa, F., Lisboa, P, Farina, P. (2021). Towards the Development of an Effective Monitoring Program of Tailings Dams: The Vale Experience. Proceedings of the 7th International Conference on Tailings Management, Chapter 5, Technologies and Instrumentation for Monitoring and Surveillance, 8p.