

Utilização de tiltímetros com comunicação satelital como alternativa ao monitoramento de taludes ao longo da Estrada de Ferro Vitória-Minas

Henrique Andrade Penido
Vale S.A., Belo Horizonte, Brazil, henrique.penido@vale.com.br

Guilherme Passos Ribas
MecRoc Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, guilherme.ribas@mecroc.com.br

Alexandre Assunção Gontijo
MecRoc Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, alexandre.gontijo@mecroc.com.br

Renan Ebenezer Alves Santana
Vale S.A., Belo Horizonte, Brazil, renan.santana@vale.com.br

Guilherme Botrel de Vasconcellos
Vale S.A., Belo Horizonte, Brazil, guilherme.vasconcellos@vale.com

RESUMO: A Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), operada pela Vale, é uma extensa rede ferroviária com mais de um século de história, conectando os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e desempenhando um papel fundamental no transporte de minério de ferro e outras mercadorias. Este estudo busca apresentar as práticas de monitoramento de taludes adotadas ao longo da EFVM, utilizando tiltímetros com comunicação via satélite. Esses instrumentos são projetados para medir continuamente a inclinação em dois eixos, fornecendo informações essenciais sobre o comportamento dos taludes. O modelo de tiltímetro escolhido possui um logger de comunicação via satélite, permitindo a análise remota de dados e reduzindo a necessidade de visitas frequentes ao local, especialmente em áreas remotas com cobertura limitada de sinal celular ou de rádio. A integração bem-sucedida desses tiltímetros para monitoramento de taludes na EFVM permite a mitigação proativa de riscos, melhorando a segurança operacional da ferrovia. O estudo também explora a metodologia de seleção de taludes, planos de monitoramento através de levantamentos aéreos com drones e modelagem 3D para otimização da alocação instrumentos, além de compartilhar dados de monitoramento obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, tiltímetros, comunicação via satélite, monitoramento remoto, EFVM

ABSTRACT: The Vitória-Minas Railway (EFVM), operated by Vale, is an extensive railway network with over a century of history, connecting the states of Minas Gerais and Espírito Santo and playing a fundamental role in the transportation of iron ore and other goods. This study seeks to present the slope monitoring practices adopted along the EFVM, using tiltmeters with satellite communication. These instruments are designed to continuously measure the inclination in two axes, providing essential information about the slope behavior. The chosen tiltmeter model has a satellite communication logger, allowing for remote data analysis and reducing the need for frequent site visits, especially in remote areas with limited cellular or radio signal coverage. The successful integration of these tiltmeters for slope monitoring on the EFVM enables proactive risk mitigation, improving the operational safety of the railway. The study also explores the methodology for selecting slopes, monitoring plans through aerial surveys with drones, and 3D modeling to optimize instrument allocation, as well as sharing obtained monitoring data.

KEYWORDS: Slope Stability, Tiltmeters, Satellite communication, remote monitoring, EFVM.

1 INTRODUÇÃO

A estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) é uma linha férrea brasileira centenária, que conecta Vitória, a capital do estado do Espírito Santo, a Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais. Além da linha principal, ramais secundários fazem a ligação com outras regiões de abastecimento de minério e outros produtos. A linha principal segue o vale do Rio Piracicaba em sua porção mais próxima a Belo Horizonte, e então segue pelo vale do Rio Doce até o estado do Espírito Santo, cruzando ambos os estados em direção aproximadamente Leste-Oeste. Ao longo de sua existência, esta ferrovia assumiu várias formas, adaptando-se aos interesses de seus proprietários e limitações técnicas em diferentes períodos históricos. Atualmente operada pela Vale, a ferrovia desempenha um papel crucial no transporte não apenas de minério de ferro, mas também de uma variedade de outras commodities de uma das maiores regiões produtoras de minério de ferro do país, conhecida como Quadrilátero Ferrífero, até a costa do estado do Espírito Santo (Carvalho 2021).

Ao longo de toda a sua extensão, a EFVM atravessa inúmeras encostas naturais e taludes construídos, onde rupturas e movimentos de massa que representam riscos para a operação da ferrovia são frequentemente observados. A extensão total da EFVM é de 905 km, totalizando 2141 km de linha férrea. Ao longo da linha existem um total de 1997 taludes em corte, e 2021 taludes de aterro, além de diversas infraestruturas construídas, sendo 51 pontes, 50 túneis e 138 elevados e pontes.

O extenso trecho da ferrovia apresenta um grande desafio para o monitoramento geotécnico de encostas, devido às dificuldades de se conduzir inspeções frequentes nessas estruturas. Além disso, a ferrovia atravessa muitas áreas sem cobertura de sinal de telefone ou rádio, dificultando ainda mais a implementação de sistemas convencionais de monitoramento e telemetria dependentes desses métodos de comunicação tradicionais.

A Figura 1 apresenta a extensão da EFVM, desde Vitória, na região costeira do estado do Espírito Santo, até a o estado de Minas gerais, região conhecida como Quadrilátero Ferrífero (QF), região de extensiva produção de minério de ferro:

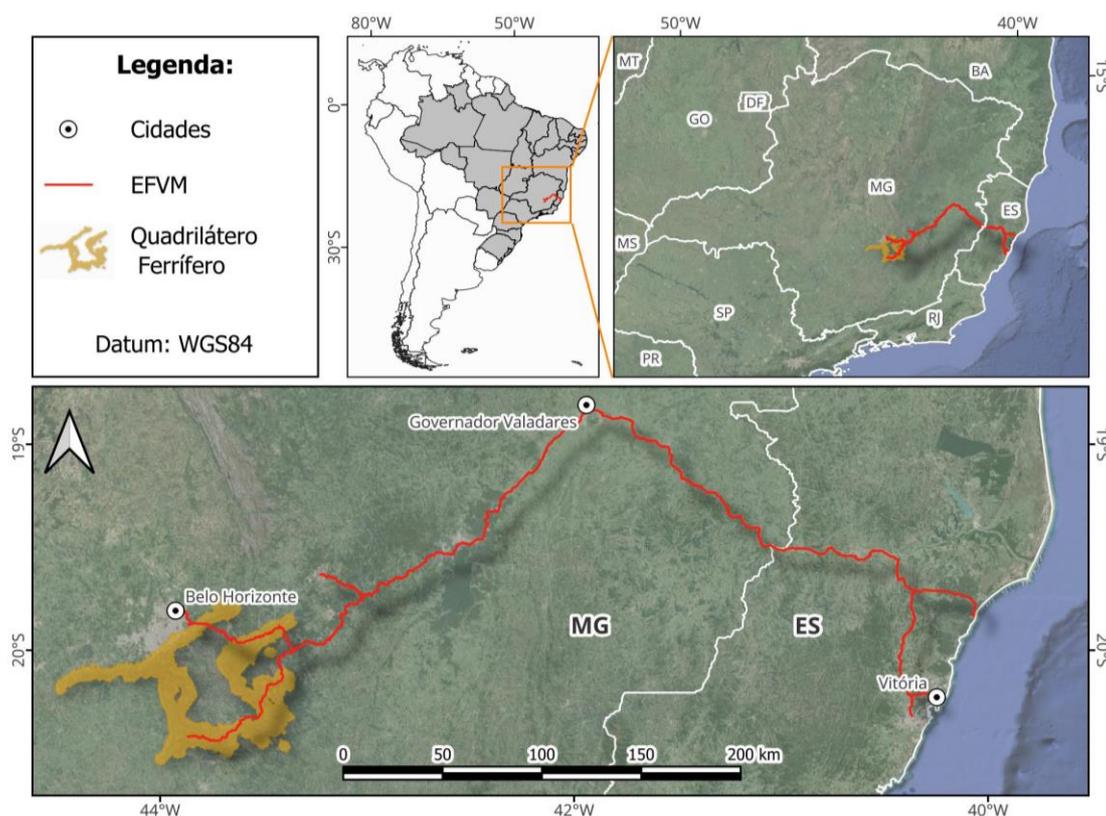


Figura 1. Localização da Estrada de Ferro Vitória-Minas.

Deslizamentos de terra e rupturas em taludes, induzidos por eventos de chuva intensa, frequentemente apresentam uma ameaça substancial para os assentamentos humanos e infraestruturas em escala global. O monitoramento de encostas é um fator crucial na avaliação dos riscos associados a essas estruturas. Seu papel

principal é servir como um alarme para eventos adversos e fornecer informações valiosas para prevenção ou redução dos impactos de rupturas e movimentos de massa. O monitoramento de fatores hidrogeológicos, climáticos e de deslocamento desempenha um papel central nessas análises (Chae, 2017).

O monitoramento de encostas pode ser dividido em três categorias principais. A primeira consiste em inspeções visuais para identificar trincas, fluxos de água e outras mudanças na superfície. A segunda categoria envolve a medição *in situ* de parâmetros hidrogeológicos, parâmetros do solo e deslocamento do solo. Instrumentos instalados em campo incluem pluviômetros, extensômetros, inclinômetros, tiltímetros e GPS para monitorar movimentos e deformações. A terceira categoria é composta por sensoriamento remoto, incluindo imagens de satélite, radar de abertura sintética (SAR), interferometria e detecção e varredura a laser (LiDAR) (Chae, 2017).

Para monitoramento terrestre em áreas remotas, os sensores precisam ser portáteis e exibir maior robustez em termos de resistência à água e variações climáticas, além de baixo consumo de energia. O monitoramento é geralmente baseado em leituras manuais de instrumentos *in situ*, onde a frequência de aquisição de dados depende das condições de acesso a esses locais (Reid et al., 2008).

Este trabalho se concentra principalmente na implementação de instrumentação terrestre, especificamente tiltímetros com comunicação via satélite, ao longo de longo da EFVM. A adoção desses instrumentos para o monitoramento de taludes visa superar os diversos desafios apresentados pelo monitoramento de encostas ao longo da ferrovia.

Os tiltímetros EWS, usados nas instalações ao longo da EFVM, apresentam um sistema automático de coleta de dados em horários programados e transmitem dados via satélite, também em horários programados. Esse sistema permite uma longa vida útil da bateria sem a necessidade de acesso no local, fornecendo informações de diversas medições realizadas ao longo do dia. Além disso, o equipamento possui uma resolução de leitura extremamente alta, permitindo a avaliação de tendências de movimento mesmo em pequenas escalas. Um sistema de alerta pré-programado permite que alarmes sejam acionados para os principais tomadores de decisão caso as leituras excedam os limites estabelecidos pelas equipes técnicas.

Como alternativa à extensa ferrovia, a primeira fase da implementação deste sistema de monitoramento, discutida neste trabalho, foi precedida por uma fase de diagnóstico geotécnico realizada pela equipe da Vale e empresas terceirizadas para categorizar os taludes com base em sua criticidade. Os taludes com maior risco foram escolhidos para a instalação inicial de instrumentos, onde novas inspeções e levantamentos aéreos também foram realizados para analisar as melhores condições de instalação. Este processo é apresentado nos capítulos seguintes.

2 OBJETIVOS

O objetivo do artigo é detalhar o processo de implementação do sistema de monitoramento de taludes ao longo da EFVM, utilizando tiltímetros com comunicação via satélite, e apresentar resultados dos monitoramentos, incluindo sua integração ao Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG) da Vale. O trabalho também pretende apresentar a metodologia proposta utilizada na seleção de taludes, elaboração de planos de monitoramento e instalações nos taludes ao longo da EFVM.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seleção dos taludes para instrumentação e monitoramento, teve início com uma inspeção geotécnica abrangente realizada pela equipe da Vale e empresas especializadas externas ao longo de toda a ferrovia. Aquelas encostas identificadas com mais alto risco geotécnico e criticidade em relação à ferrovia foram priorizadas para monitoramento utilizando tiltímetros. Posteriormente, foram realizados levantamentos aéreos detalhados nos taludes selecionados, para geração de dados tridimensionais, formando a base para o desenvolvimento de planos de monitoramento individualizados para cada estrutura. Nas etapas finais, os tiltímetros foram instalados, e os dados passaram a ser monitorados remotamente no Centro de Monitoramento Geotécnico da Vale. Os detalhes de cada etapa são discutidos neste capítulo. A Figura 2 apresenta as principais fases na implementação dos instrumentos:

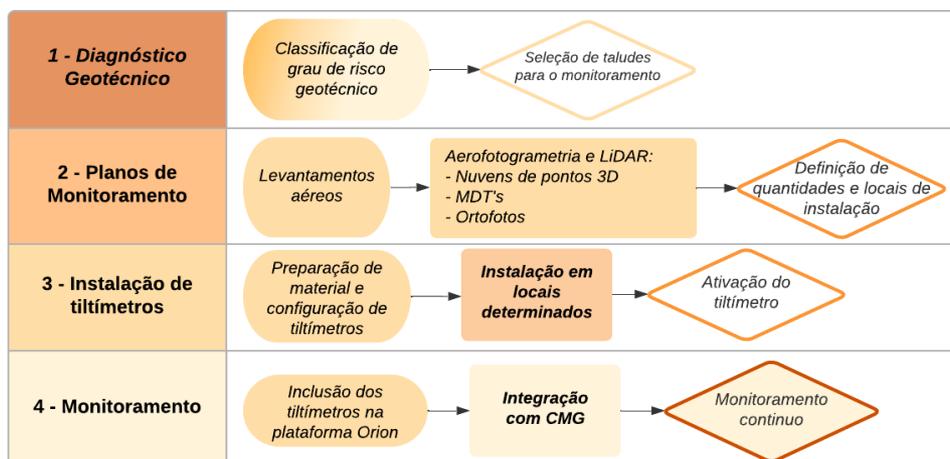


Figura 2. Quadro geral da metodologia utilizada na implementação do sistema de monitoramento.

A fase inicial da implementação do sistema de monitoramento, que envolveu o diagnóstico geotécnico ao longo de toda a ferrovia para classificação de risco dos taludes, não constitui o objetivo principal deste trabalho, e não será discutido em detalhe. Para a primeira fase da instalação, foram selecionados 20 taludes para a instrumentação, e até a data de publicação deste artigo, 30 tiltímetros já se encontram instalados em 10 taludes ao longo da ferrovia. A Figura 3 apresenta a localização dos taludes onde foram realizadas as instalações até a data da publicação do artigo:

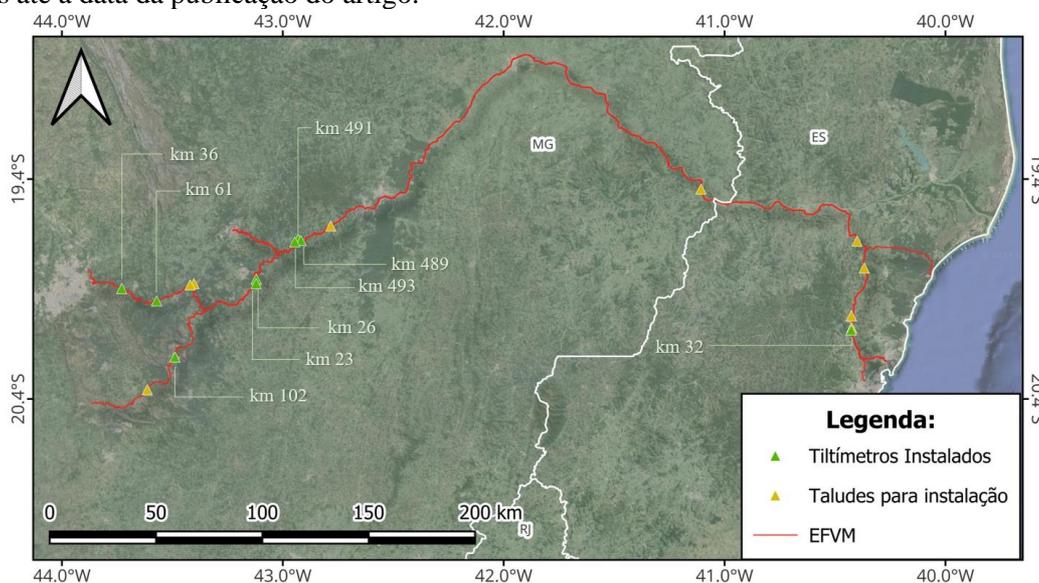


Figura 3. Locais de instalação de tiltímetros ao longo da EFVM.

Nos taludes selecionados, foram realizados levantamentos com veículos aéreos não tripulados (Drones) para geração de dados tridimensionais de cada talude selecionado. Esses modelos foram utilizados para análise do terreno em um ambiente computacional, medições de distância e volume, análise de possíveis acessos aos locais de instalação e geração de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) e Ortomosaicos, que foram então utilizados para definir, com maior detalhe, as localizações exatas para a instalação dos instrumentos.

Para os levantamentos aéreos, foi utilizado o drone DJI Matrice 300 RTK, com a câmera fotogramétrica DJI P1 embarcada. As imagens capturadas nos levantamentos foram processadas no software Agisoft Metashape com a técnica de aerofotogrametria, para gerar os dados tridimensionais mencionados acima. Outros softwares de *Computed Aid Design* (CAD) e de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) também foram utilizados para análises de dados e geração de mapas. Mais detalhes sobre os produtos desses levantamentos são apresentados na seção "Resultados" do artigo.

Após a etapa de inspeções e levantamentos aéreos, foram elaborados planos de monitoramento para cada talude selecionado, onde foram descritas as principais características de cada ativo, identificadas as principais fragilidades geotécnicas e então determinados os melhores locais para instalação de tiltímetros.

A etapa seguinte, consistiu na instalação dos instrumentos em cada ativo. A metodologia de instalação consiste em 4 etapas:

1. Perfuração do solo com furadeira e broca helicoidal (Profundidade de 500mm e diâmetro de 50mm)
2. Injeção de calda de cimento na perfuração, e inserção da haste metálica de sustentação.
3. Fixação de suporte metálico ajustável na haste, através de parafusos e brocas.
4. Fixação do Tiltímetro ao suporte, e ajuste na posição horizontal.

Os tiltímetros realizam a medição da inclinação em duas dimensões (dois eixos horizontais, A e B), e foram instalados convencionalmente com seu eixo B paralelo à ferrovia. Este padrão torna mais intuitiva a interpretação dos dados, caso variações angulares sejam observadas em algum instrumentos. A Figura 4 (A, B e C) ilustra o modelo de tiltímetro utilizado nas instalações, os principais materiais empregados na instalação e suas dimensões (em mm), e a orientação do tiltímetro em relação à ferrovia, respectivamente.

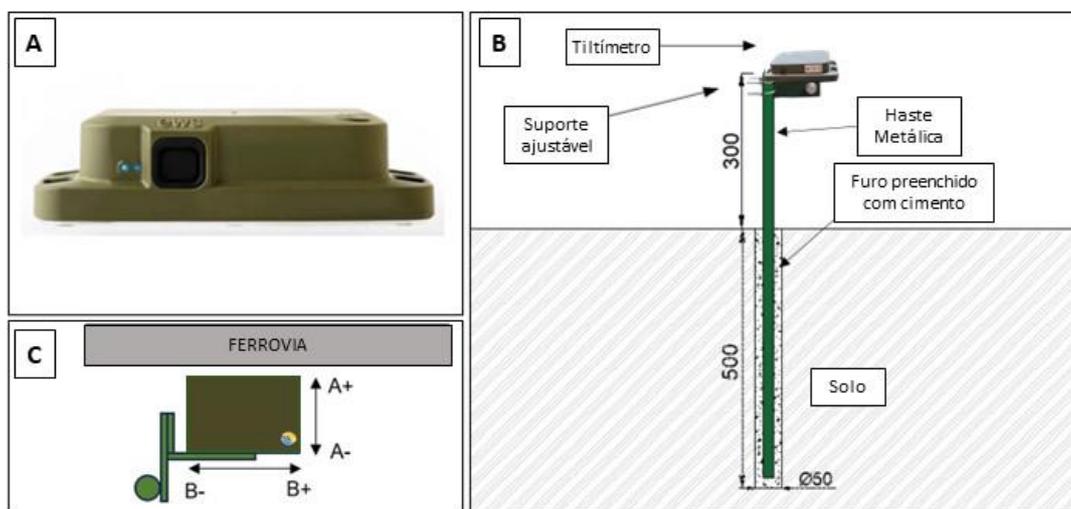


Figura 4. A) Tiltímetro EWS utilizado nas instalações. B) Principais componentes da instalação dos tiltímetros. C) Orientação dos tiltímetros em relação à ferrovia.

Uma vez instalados, os tiltímetros podem ser acessados via Bluetooth utilizando um aplicativo compatível com as plataformas IOS e Android. A ativação inicial envolve a realização da primeira leitura e a realização de um teste de comunicação para garantir a transmissão dos dados a partir da leitura inicial. Os tiltímetros são configurados para realizar leituras e transmitir dados em taxas predefinidas, visando obter uma alta amostragem diária e otimizar o consumo de bateria para maior durabilidade menor necessidade de manutenções.

Para as instalações da EFVM, os tiltímetros foram programados para realizar medições a cada hora, o que resulta em um total de 24 leituras diárias. Posteriormente, os dados adquiridos são armazenados na memória do instrumento, e sua transmissão via satélite ocorre a cada 3 horas. Os dados são então disponibilizados em plataforma online da própria fabricante do instrumento, denominada Orion. Para aumentar a capacidade de resposta, um recurso de alarme é incorporado em cada instrumento, onde caso medições acima de um valor pré-determinado para cada estrutura seja atingido, um alarme é acionado pela plataforma Orion. Esse alarme envia alertas por e-mail e SMS aos principais tomadores de decisão. Esses alertas servem como

um mecanismo de notificação proativo, permitindo uma ativação mais rápida do plano de ação predeterminado para cada estrutura.

A Figura 5 apresenta uma linha do tempo para um cronograma diário de aquisição e transmissão de dados, configurado nos tiltímetros:

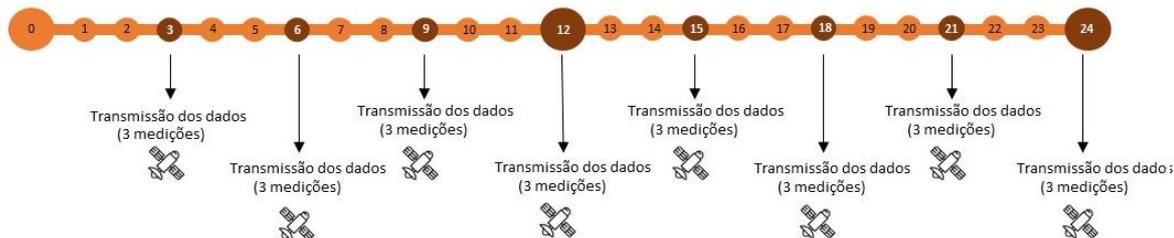


Figura 5. Linha do tempo diária de coleta de dados e transmissão via satélite

Para um monitoramento mais eficaz por parte do Centro de Monitoramento Geotécnico da Vale, foi realizada uma integração de dados entre o servidor da fabricante dos tiltímetros, e softwares de monitoramento geotécnico já utilizados pela Vale. Esta integração, realizada por protocolos de comunicação (API), permitiu que o monitoramento com tiltímetros fosse integrada à rotina de monitoramento da equipe de forma mais ágil, e orgânica com outros monitoramentos já em andamento anteriormente à utilização de tiltímetros com comunicação satelital.

4 RESULTADOS

4.1 Planos de monitoramento e Instalações

A fase inicial das atividades de instalação envolveu levantamentos aéreos utilizando drones para gerar dados cartográficos tridimensionais, que serviram como base para o desenvolvimento de planos de monitoramento detalhados para cada talude. Os principais resultados dos levantamentos, produzidos por meio de técnicas aerofotogramétricas, incluem nuvens de pontos tridimensionais, modelos digitais de terreno e ortofotos. Além desses produtos, fotos aéreas detalhadas permitem uma análise mais abrangente do cenário de cada talude, identificação dos principais fatores de risco geotécnico e mecanismos de ruptura de cada talude.

Uma vez que a posição dos tiltímetros foi determinada para as instalações, eles foram instalados de acordo com a metodologia desenvolvida para uma instalação prática e robusta, descrita no capítulo anterior. A Figura 6 apresenta os principais produtos dos levantamentos com aéreos com drones, utilizados na elaboração dos planos de monitoramento, o método de perfuração e instalação, e o tiltímetro instalado no talude da ferrovia:

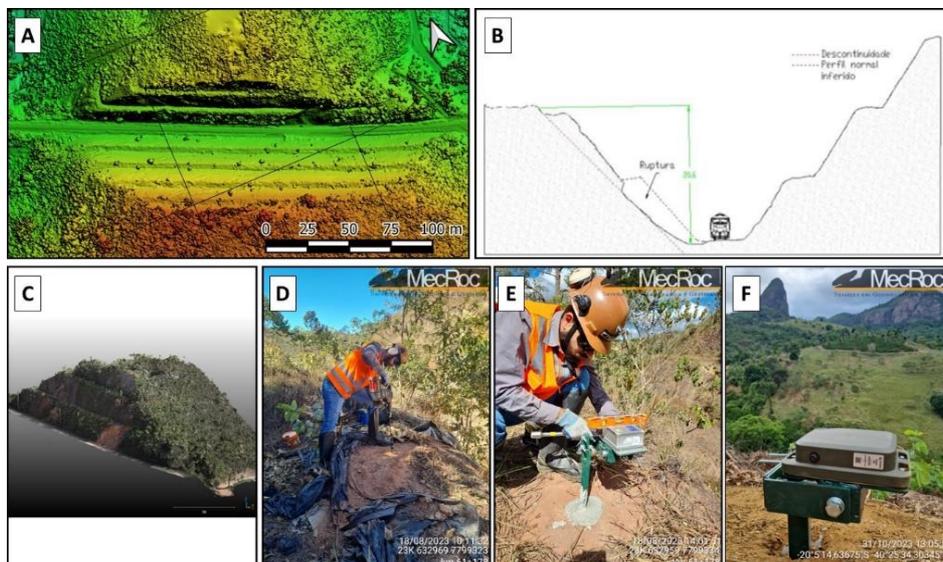


Figura 6. Linha do tempo diária de coleta de dados e transmissão via satélite

4.2 Dados dos sensores

As instalações ocorreram em várias etapas, abrangendo de dezembro de 2022 a março de 2024, englobando um total de 28 instalações de tiltímetros em 10 taludes diferentes (Figura 3). As demais instalações em andamento, têm término agendado para junho de 2024.

O período de monitoramento mais longo é o do talude do “km61”, onde 3 tiltímetros foram instalados em 01/11/2023, completando 140 dias de monitoramento até a data de publicação do artigo (20/03/2024). Posteriormente foram instalados outros 4 tiltímetros neste mesmo ativo, para aumentar a redundância e área de monitoramento do talude.

Com o monitoramento contínuo das medições realizadas pelos tiltímetros, e transmitidas via satélite 8 vezes ao dia, também foi possível observar o percentual de falhas de transmissão de dados pelos equipamentos. Apesar de os tiltímetros apresentarem alta robustez a capacidade de transmissão remota de dados, a transmissão via satélite depende de condicionantes geográficos, eletrônicos, e de posicionamento de satélites, que muitas vezes fogem ao controle do usuário final da tecnologia. Uma vez que os tiltímetros realizar 8 transmissões de dados por dia, foram registrados todos os momentos em que não houve transmissão de dados nos horários programados, para cada instrumento instalado. Em relação ao total de transmissões realizadas por cada tiltímetro, o percentual de falhas de transmissão encontrado foi menor que 3% em todos os equipamentos monitorados, o que demonstrou uma boa performance do sistema de monitoramento.

Variações mínimas nas leituras foram observadas diariamente, embora em uma escala muito pequena. Estas flutuações estão associadas às variações diárias de temperatura, que têm por consequência uma expansão e contração natural do terreno e dos componentes metálicos da instalação. Notavelmente, o instrumento EWS 455 exibiu uma variação total de inclinação de $0,01^\circ$ em relação ao seu valor de instalação inicial, em 3360 leituras, indicando alta resolução do sensor e baixos níveis de ruído nas leituras.

Tabela 1. Dados de medições dos tiltímetros

Talude	Tiltímetro	Instalação	Transmissões	Falhas de Transm. (%)	Incl. Max. (A)	Incl. Max. (B)
Km 23	EWS 333	01/02/2024	384	2,61	0.05	0.13
	EWS 351	01/02/2024	348	0,0	0.05	0.07
Km 26	EWS 417	01/03/2024	152	0,0	0.03	0.11
	EWS 440	01/03/2024	152	0,0	0.02	0.07
	EWS 449	01/03/2024	152	0,0	0.03	0.11
	EWS 455	01/03/2024	152	0,0	0.01	0.08
Km 32	EWS 328	04/11/2023	1096	1,05	0.14	0.41
	EWS 329	04/11/2023	1096	1,05	0.02	0.09
Km 36	EWS 313	02/11/2023	1112	0,0	0.14	0.15
	EWS 319	02/11/2023	1112	0,0	0.11	0.19
	EWS 416	16/02/2024	264	0,0	0.03	0.13
	EWS 436	16/02/2024	264	0,0	0.03	0.06
	EWS 448	16/02/2024	264	0,0	0.02	0.09
	EWS 462	16/02/2024	264	0,0	0.04	0.13
Km 61	EWS 310	01/11/2023	1120	0,53	0.13	0.15
	EWS 314	01/11/2023	1120	0,21	0.03	0.13
	EWS 317	01/11/2023	1120	0,0	0.18	0.10
Km 102	EWS 320	17/11/2023	992	1,16	0.07	0.11
	EWS 325	17/11/2023	992	1,05	0.03	0.15
	EWS 330	17/11/2023	992	0,42	0.12	0.09
	EWS 352	17/11/2023	992	0,11	0.10	0.15
Km 489	EWS 337	18/01/2024	496	0,31	0.04	0.21
	EWS 338	18/01/2024	496	2,1	0.04	0.15
	EWS 354	18/01/2024	496	1,39	0.03	0.14
Km 491	EWS 331	14/11/2023	1016	1,05	0.05	0.26
	EWS 345	14/11/2023	1016	0,0	0.05	0.19
Km 493	EWS 408	28/02/2024	168	0,0	0,09	0,08
	EWS 444	28/02/2024	168	0,0	0.03	0.08

5 CONCLUSÕES

A análise dos dados dos tiltímetros instalados em locais remotos, sem sinal de rádio ou celular ao longo da Estrada de Ferro Vitória-Minas permitiu à equipe técnica da Vale monitorar taludes críticos para a segurança operacional da ferrovia. Em taludes onde foram identificados movimentos, foi possível tomar decisões rapidamente, facilitando o rápido envio de uma equipe técnica para inspecionar os taludes onde foram detectadas movimentações.

Foi observada uma alta consistência nos dados, com medidas precisas e baixo nível de ruído nas leituras. A variação mínima foi registrada no tiltímetro EWS455, registrando uma variação máxima de $0,01^\circ$ ao longo de todo o período de monitoramento de 140 dias, abrangendo 3360 leituras. Essa alta resolução nas leituras permite a análise precoce de variações mínimas, aprimorando a capacidade de prever com maior precisão uma situação de risco iminente.

Apesar de estar sujeito a fatores atmosféricos e climáticos, bem como a problemas de cobertura de sinal que podem levar a falhas ocasionais na transmissão de dados, o sistema demonstrou bom desempenho, com um percentual de falhas de transmissão abaixo de 3% em todos os casos observados. Estes fatores permitem que sejam monitorados os taludes de maneira completamente remota, e sem a necessidade de frequentes visitas para manutenção ou inspeção nos equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carvalho, A. S. (2021). A geografia histórica da Estrada de Ferro Vitória a Minas (1904–2020): um registro. *Terra Brasiliis (Nova Série)*. Revista da Rede Brasileira de História da Geografia e Geografia Histórica, (16).
- Chae, B. G., Park, H. J., Catani, F., Simoni, A., & Berti, M. (2017). Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art. *Geosciences Journal*, 21, 1033-1070.
- Reid, M. E., Baum, R. L., LaHusen, R. G., & Ellis, W. L. (2008). Capturing landslide dynamics and hydrologic triggers using near-real-time monitoring. *Landslides and engineered slopes*, 179-191.