

REVISÃO DAS TECNOLOGIAS E INSTRUMENTAÇÕES DE TALUDE E PLATAFORMA FERROVIÁRIA

Thiago Cezar Oliveira, M.Sc., Vale S.A., Brasil

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães, D.Sc., Instituto Militar de Engenharia (IME), Brasil

Luiz Antonio Silveira Lopes, D.Sc., Instituto Militar de Engenharia (IME), Brasil

RESUMO

O presente artigo aborda o estado atual das tecnologias e instrumentações utilizadas no monitoramento, instrumentação e manutenção de taludes e plataforma ferroviária. A pesquisa busca oferecer uma visão abrangente das metodologias empregadas para garantir a estabilidade e segurança dessas estruturas fundamentais para a infraestrutura ferroviária. Ao longo do artigo, são discutidas diversas tecnologias inovadoras aplicadas à análise de taludes. O monitoramento geotécnico, por exemplo, é destacado como uma área crítica, com sistemas modernos de sensores e instrumentações geotécnicas desempenhando um papel crucial na detecção precoce de movimentos de solo e potenciais deslizamentos. A plataforma ferroviária, outro elemento central no contexto, é abordada quanto aos desafios enfrentados em sua manutenção e estabilidade. O artigo explora tecnologias inovadoras para avaliação da integridade da plataforma, considerando aspectos como nivelamento, deformação e degradação. Além disso, a revisão apresenta casos de estudo e aplicações práticas dessas tecnologias em cenários ferroviários reais. Destaca-se a importância de abordagens integradas que combinem diferentes métodos para proporcionar uma compreensão abrangente do comportamento do talude e da plataforma. A conclusão do artigo ressalta a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento nesse campo, visando aprimorar as tecnologias existentes e desenvolver novas soluções para enfrentar os desafios emergentes na gestão eficaz de taludes e plataformas ferroviárias. Em última análise, a revisão destaca a importância estratégica dessas tecnologias para garantir a segurança, eficiência operacional e durabilidade das infraestruturas ferroviárias em todo o mundo.

Palavras-chaves: Instrumentação; Monitoramento geotécnico; Infraestrutura ferroviária.

1. INTRODUÇÃO

A inspeção da infraestrutura ferroviária e manutenção preventiva são considerados duas grandes tarefas para manter a infraestrutura ferroviária segura e operacional. Sem inspeção adequada e planejamento de manutenção, aumenta o risco de falha nas redes ferroviárias, o que pode levar a vítimas humanas catastróficas e enormes perdas financeiras. A inspeção é o pré-requisito da prevenção ferroviária manutenção, o que pode ajudar operadores e tomadores de decisão observar o estado da infraestrutura ferroviária e alertá-los sobre perigos potenciais (Uzarski & Grussing 2013; Kacunic & Carro 2016).

As linhas ferroviárias são muitas vezes, margeadas por taludes, esses são sujeitos à movimentações de massas de solo e rocha, com consequências danosas que implicam em perda de transportes, restrições de velocidades e interrupção do tráfego (Guzzetti et al., 2003; Mukenga et al., 2017; Quang et al., 2018; Winter et al., 2014; Wong e Ho, 2004; Xu e Zhang, 2010). Estudos descrevem que a identificação dos gatilhos geotécnicos para a movimentação de massa baseia-se, fundamentalmente, nas distinções entre agentes predisponentes e efetivos (Chowdhury e Flentje, 2003; García-Delgado et al., 2019).

Nos últimos anos na Estrada de Ferro Carajás, ocorreram eventos com causa raiz de infraestrutura de via Permanente que tiveram impactos operacionais graves. Tais eventos, não foram previstos ou monitorados antecipadamente, gerando manutenções corretivas emergenciais com alto custo e prazo prolongado de recuperação.

Nas ferrovias da Áustria ÖBB, tem-se utilizado Big Data, IA, Deep Learning em uma plataforma de dados integrados para ter correlação de eventos de infraestrutura a partir de dados de superestrutura do Carro Controle, GPR, LiDar scanners, pluviometria, parâmetros dos ativos. Com essa plataforma é possível responder e antecipar manutenções oriunda de problemas de infraestrutura, sublastro, talude de corte e aterro ou subleito, direcionando os esforços no ponto ideal para uma renovação de lastro, recuperação de talude, drenagem ou até mesmo da plataforma.

Na EFC possuímos uma gama de dados que norteiam na análise de falhas e defeitos, no entanto, é necessário ter a integração de todos esses dados em uma única plataforma que através da ciência de dados seja possível tornar a manutenção de infraestrutura mais preditiva em vez de preventiva ou corretiva.

Portanto, o objetivo desse trabalho é delimitar a utilização das instrumentações e tecnologias para prever e monitorar falhas nos ativos de infraestrutura com o intuito de antecipar manutenção em ativos antes que gerem perda ou impacto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os principais problemas geotécnicos de infraestrutura de ferrovia são: erosão, escorregamento em talude de corte e aterro e recalque na plataforma da via.



Figura 1. Problemas Geotécnicos mais comuns em Ferrovias

Quando se fala em monitoramento e previsão de movimentações de massa, seja solo ou rocha, voltados a estruturas ferroviárias, Fu et al (2021) subdividem o assunto internamente em três estágios: i) fase de pesquisa e projeto e ii) fase de construção e iii) fase de operação da ferrovia.

A fase de operação provoca um aumento de cargas e vibrações no terreno que, associados a outros elementos hidrogeológicos e antrópicos, podem dar origem a

movimentações de massa. Neste caso, quando identificados, estes locais passam a ser monitorados para o acompanhamento da evolução destes fenômenos, buscando avaliar o impacto nas ferrovias e avaliar a necessidade de manutenções preventivas ou corretivas em menores intervalos de tempo, como são os casos apresentados por Macciotta e Hendry (2021).

Sabe-se que o monitoramento dos taludes deve ser baseado em estudo geológico e geotécnico detalhado. Entretanto, deve-se considerar adequadamente os métodos a serem utilizados para cada campanha de monitoramento, tendo em mente o objetivo a ser alcançado. Para a determinação das diretrizes do monitoramento, deve-se considerar, além das características básicas, a combinação orgânica dos diversos métodos existentes, buscando obter o melhor efeito do sistema (Fu et al., 2021).

Abaixo, estão listados os 4 princípios básicos para o monitoramento de taludes apresentados por Fu et al. (2021):

- Os métodos de monitoramento devem considerar as características do talude, condições geológicas e ambientais na escolha do monitoramento apropriado. O sistema deve ser prático e confiável, além de seguro. É melhor desenvolver algo pequeno e preciso do que grande e ambíguo.

- Os instrumentos de monitoramento devem ser combinados de tal forma que não provoquem interferências entre si e com o ambiente. Observar as condições naturais da encosta e a possibilidade de interferências e ruídos nas leituras dos instrumentos, a depender da natureza tecnológica para aquisição dos dados (mecânica ou elétrica, por exemplo). Também deve-se atentar para a duração do monitoramento. Campanhas mais longas precisam de instrumentos de fácil manutenção e longa vida útil, sem perder qualidade na aquisição dos dados.

- O conteúdo do monitoramento deve ser baseado na estrutura geológica, na forma espacial e nas fases do talude. Deve-se saber o que se pretende investigar e ser objetivo, delimitando corretamente a área e escolhendo as variáveis-chave, seguindo o princípio de que menos é mais, buscando variar os parâmetros investigados ao invés de privilegiar a quantidade.

- A acurácia e precisão do monitoramento deve ser ajustada por meio de uma análise abrangente utilizando informações de reconhecimento de campo, histórico de deslizamentos na região, mecanismos de formação, grau de importância, tendências de desenvolvimento das deformações. Nem sempre o que dá certo para um caso, vai se repetir da mesma forma para outro.

Deve-se determinar o período de monitoramento principalmente de acordo com o estágio de deformação do maciço e as propriedades monitoradas escolhidas. Geralmente, para pequenas deformações e movimentos muito lentos, o período de observação tende a ser maior e exige uma maior precisão. Os sistemas de monitoramento também devem ser ajustados antes e depois dos períodos de eventos climáticos extremos.

O processo de monitoramento deve percorrer toda a atividade de engenharia. De acordo com Fu et al (2021), o monitoramento é uma questão de oportunidade: momento oportuno, análise oportuna, tempo oportuno e tomada decisões oportunas. Portanto, um bom monitoramento de informações é fundamental para o avanço da engenharia geotécnica em encostas, tornando as construções e a vivência local mais segura e eficaz.

No passado, monitoramentos eram realizados utilizando instrumentos mecânicos ou manuais, que foram evoluindo gradualmente para dispositivos automáticos e de alta precisão.

Os instrumentos podem ser agrupados de acordo com a natureza de aplicação das suas medições, tais como:

- Deformação de superfície: instrumentos de medição geodésica, GPS e métodos que envolvem fotografias e radar.
- Deformação do subsolo: métodos que aproveitam furos de investigação e utilizam deformação em sua seção longitudinal.
- Sons/ruídos: instrumentos que medem ruídos do ambiente ou que emitam sinais e avaliam as respostas.
- Hidrológicos: medidores de pressões de água, nível do lençol freático e variações do nível d'água em corpos hídricos.
- Ambientais: medidores de precipitação, pressão, temperatura e ações sísmicas.

O desenvolvimento e aprimoramento dos instrumentos influencia diretamente no avanço tecnológico e dos métodos de monitoramento, a exemplo do uso de GPS, sensoriamento remoto, telemetria e fibra óptica, que tornaram o monitoramento de escorregamentos de terra muito mais poderoso e preciso. Du et al (2020) apresentam uma revisão sobre a utilização de fibra óptica como instrumento de sensoriamento em ferrovias. No trabalho, os autores abordam a sua utilização como componente do que se reconhece como Structural Health Monitoring (SHM), apresentando exemplos de sua utilização nos trilhos, estruturas de concreto, pontes, túneis e no monitoramento de escorregamentos.

2.1. Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR)

O InSAR, que significa Interferometria de Radar de Abertura Sintética (do inglês, Interferometric Synthetic Aperture Radar), é uma técnica de sensoriamento remoto que usa imagens de radar de satélite para medir deformações na superfície da Terra (Bamler e Hartl, 1998).

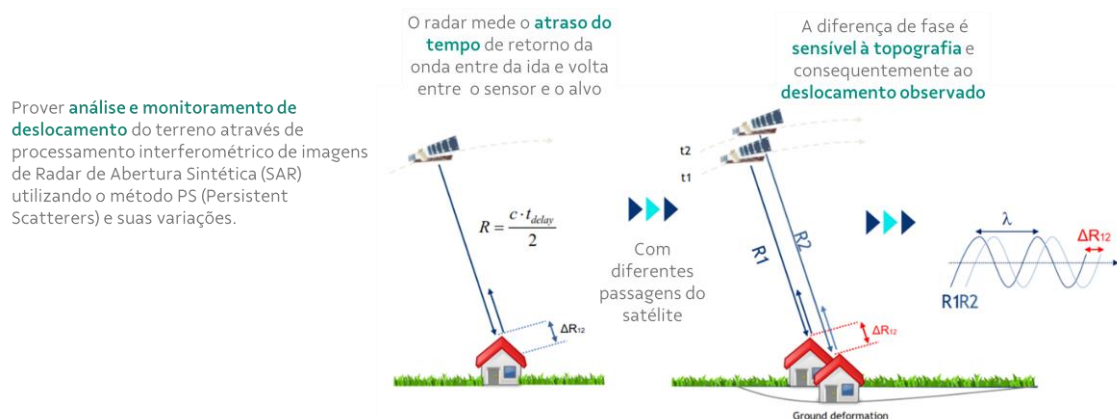


Figura 2. Esquema de funcionamento do InSAR (Pepe e Calò, 2017)

Os outputs do InSAR incluem informações detalhadas sobre a topografia da superfície e as deformações que ocorreram ao longo do tempo. Alguns dos principais outputs do InSAR incluem:

- Mapas de Deformação: o InSAR é amplamente utilizado para detectar e medir deformações na superfície da Terra, como subsidência ou levantamento do solo. Isso é particularmente útil para monitorar áreas propensas a movimentos de terra, terremotos ou subsidência devido à extração de recursos naturais, como água subterrânea (Squarzoni et al. 2020, Chen et al 2021)
- Detecção de Deslizamentos de Terra e Subsidência: O InSAR é eficaz na detecção de movimentos de terra, como deslizamentos de terra e subsidência. Ele fornece informações precisas sobre a magnitude e a taxa de deslocamento.

• **Monitoramento de Estruturas:** O InSAR também é usado para monitorar estruturas, como represas, pontes e edifícios, identificando movimentos sutis que possam indicar problemas de estabilidade (Patricio, 2018).

Em resumo essa tecnologia é aplicada para monitorar deslocamentos em áreas extensas, trazendo grandes avanços na área de instrumentação de obras de engenharia e encostas, tendo o potencial de fornecer modelos de elevação digital (DEMs) com precisão de metros e deformações milimetricamente precisas (Ferreti et al., 2001).

Na Estrada de Ferro Carajás é utilizado essa tecnologia a partir do satélite Sentinel, banda C, com orbita apenas descendente, com tamanho de pixel (20 m x 5 m). A metodologia de análise é realizada a partir da delimitação das áreas de influência dos ativos classificados no diagnóstico geotécnico com base no risco. Os parâmetros analisados são: velocidade (mm/ano), deslocamento acumulado (mm), coerência e padrão de deslocamento. Na sequência é identificado as áreas com anomalias e classificado conforme a criticidade para fazer o acompanhamento nas próximas leituras do InSar ou a realizar inspeção de campo por um geotécnico experiente.

Na foto abaixo possui um exemplo de talude seção mista aterro/corte próximo de um rio com deslocamento acumulados de julho/2020 até novembro/2021 na ordem de 25 mm.

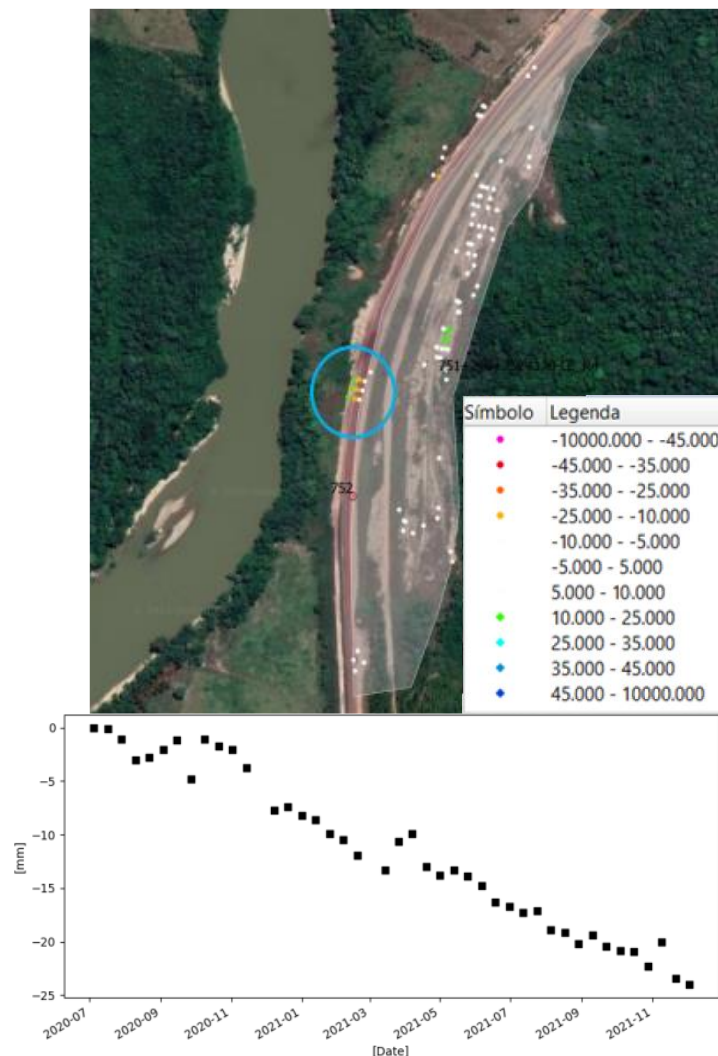


Figura 3. Talude ferroviário monitorado com InSar

2.2. Radar Interferométrico

Radares interferométricos baseados em solo (GBIR) são instrumentos modernos para o monitoramento de deslocamentos, movimentos de massa e taludes instáveis capazes de gerar imagens de deformações do solo em grandes áreas, com alta resolução espacial (valores menores que 1 mm) e temporal. Comparado ao InSar, ele é aplicado para taludes com risco geotécnico crítico e com maior intensidade de monitoramento, pois ele possui maior precisão (0,1mm), maior frequência (a cada 2 min), cobertura ampla (60 a 360 graus).

O GBIR é uma tecnologia de sensoriamento remoto que fornece uma medição contínua de deslocamento através de emissões de ondas de rádio suficiente para monitorar uma variedade de movimentos de massa ativos em uma variedade de velocidades. É, portanto, uma ferramenta que preenche lacunas de outros tipos de medições convencionais como o monitoramento topográfico usual com prismas.

A interferometria computa o deslocamento de cada pixel pela comparação da informação de fase do sinal do radar, coletada em diferentes intervalos de tempo, de ondas refletidas no objeto, fornecendo uma medição com acurácia milimétrica.

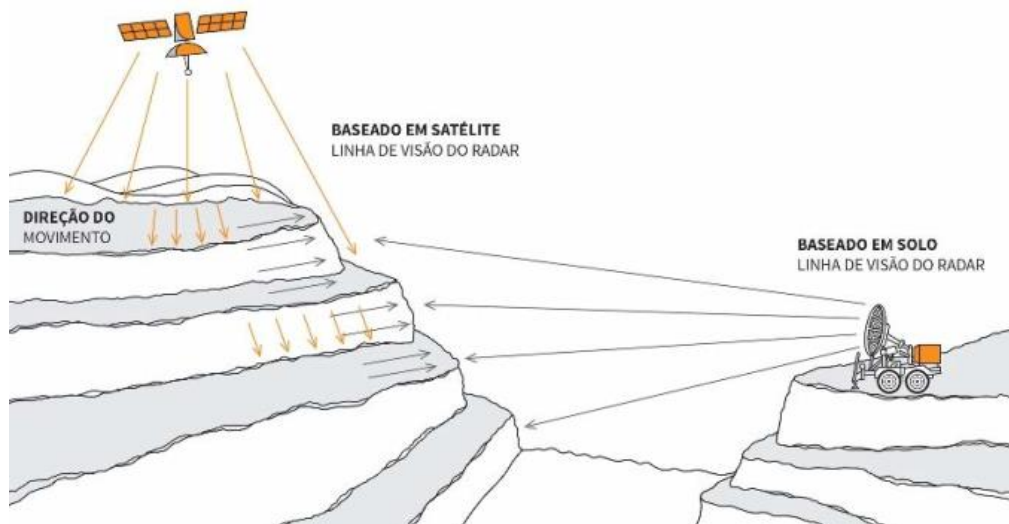


Figura 1. Esquema ilustrando o funcionamento da interferometria baseada em satélite e em solo

O procedimento para realização de monitoramento de deslocamentos por radares interferométricos consiste em comparar a fase e amplitude de duas ou mais imagens de radar, para detectar pequenas mudanças na superfície terrestre que não são verificadas por outros métodos tradicionais de processamento de imagens conforme imagem a seguir de uma mina.

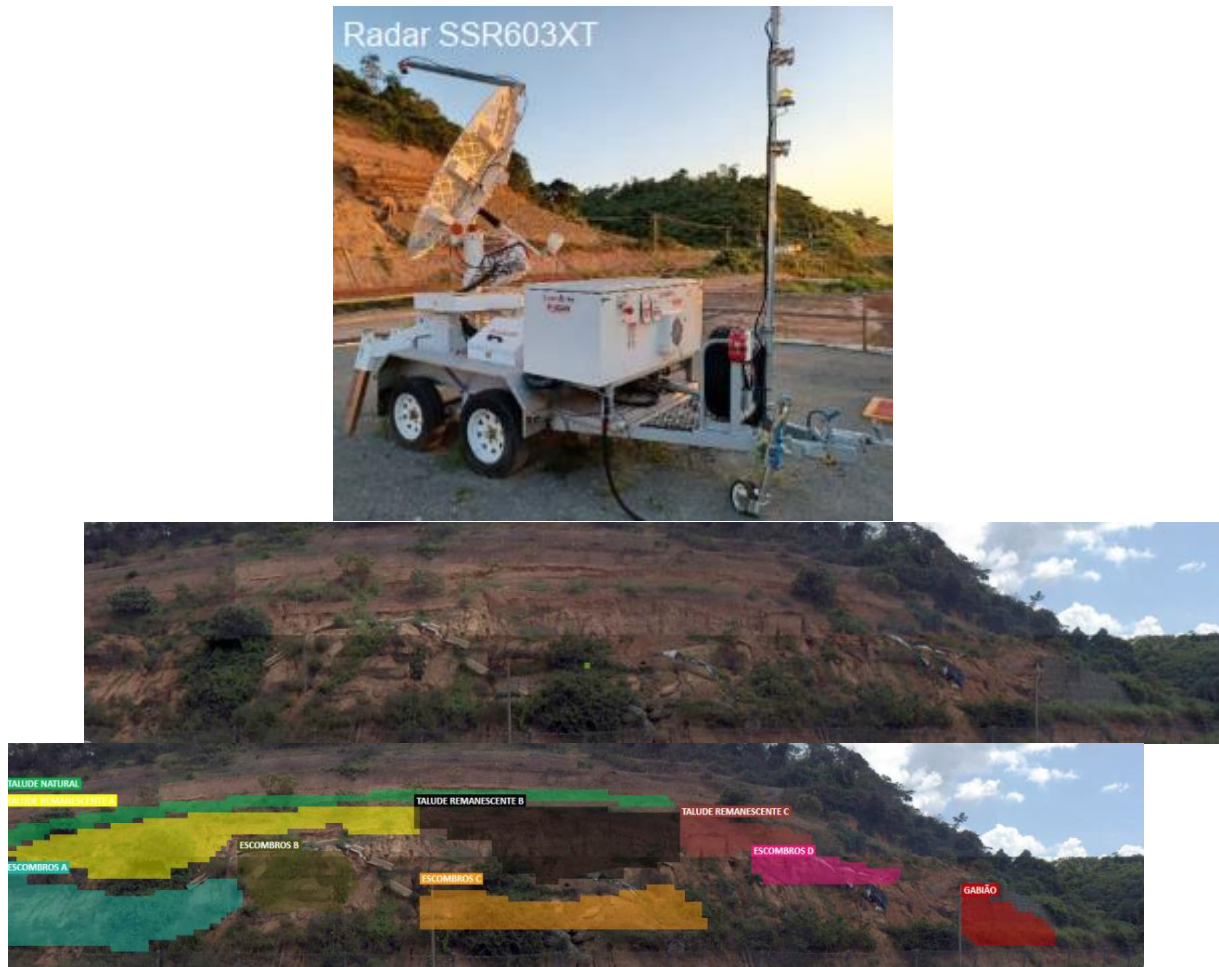


Figura 2. Exemplo de talude monitorado com radar baseado em solo

2.3. Tiltmeter

Os tiltmeters são frequentemente usados no monitoramento de taludes para medir a inclinação dessas superfícies e detectar quaisquer movimentos ou instabilidades que possam representar riscos geotécnicos.

Em resumo, os tiltmeters desempenham um papel importante na prevenção de deslizamentos de taludes e na segurança pública, fornecendo informações críticas sobre a estabilidade do terreno em tempo real (Uchimura, et al. 2011, Artese, et al 2015 ,Li, et al 2016, Zhu, J. Et al 2020, Denis et al. 2021). Eles são uma ferramenta valiosa para engenheiros e geólogos envolvidos no monitoramento de encostas e taludes.

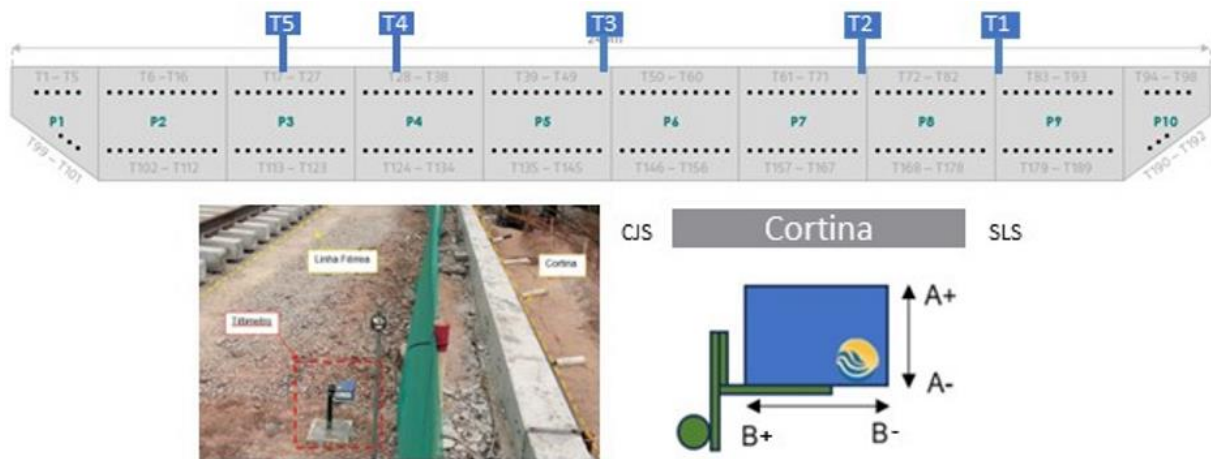


Figura 3. Cortina atirantada monitorada com tiltmeter

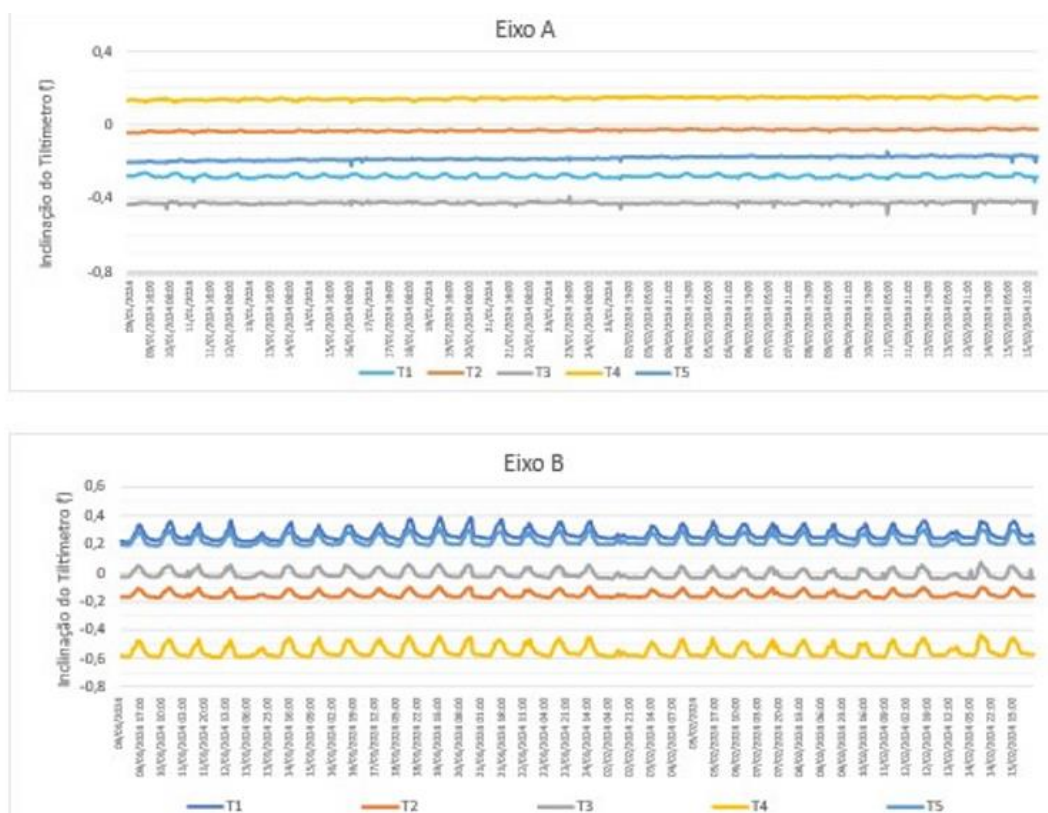


Figura 4. Exemplo de relatório dados dos 5 tiltmeter monitorados

2.4. Estação Total Robótica

As estações totais robóticas são instrumentos de levantamento topográfico avançados que podem ser usados para o monitoramento de taludes com eficiência e precisão. Elas oferecem a capacidade de medir ângulos horizontais e verticais, distâncias e coordenadas tridimensionais com alta precisão. Quando usadas em conjunto com software especializado, essas estações totais robóticas podem ser valiosas para o monitoramento de taludes.

É importante ressaltar que a eficácia do monitoramento de taludes com estações totais robóticas depende da instalação adequada, da configuração adequada dos intervalos de medição e da análise competente dos dados coletados. Além disso, esses sistemas podem ser integrados com sistemas de comunicação para alerta e plano de atendimento ao risco e emergência.

Em resumo, as estações totais robóticas são ferramentas valiosas para o monitoramento de taludes, fornecendo medições precisas e automatizadas que podem ajudar a garantir a segurança e a estabilidade dessas áreas.



Figura 8. ETR monitorando taludes em encosta urbana

2.5. Piezômetros Automáticos

Piezômetros automáticos são dispositivos de monitoramento usados para medir a pressão da água no solo, o que é essencial para avaliar a estabilidade de taludes, encostas e barragens. Eles desempenham um papel fundamental no monitoramento geotécnico, fornecendo informações sobre a saturação do solo e o comportamento da água subterrânea.

2.6. Ground Penetration Radar

O GPR é uma tecnologia que utiliza ondas de rádio para mapear a subsuperfície do solo. Em ferrovias, o GPR pode ser usado para detectar e avaliar várias condições, como: problemas de fundação, infiltração de água, vazamentos e cavidades, detecção de objetos estranhos.

O radar de penetração no solo (GPR) é uma tecnologia comprovada para mapear mudanças na espessura real e na qualidade da lastro e camadas mais profundas da via em toda uma rede. A combinação de medições da geometria da via com o GPR fornece informações únicas baseadas nas condições, a fim de planejar uma estratégia abrangente e economicamente eficaz para o gerenciamento do lastro e da via férrea.

Os dados obtidos a partir de uma pesquisa com GPR são resumidos em termos de informações que podem ser obtidas sobre a espessura e profundidade das interfaces identificáveis da via, chamadas de "métricas de camada", e informações sobre a qualidade da camada de lastro, na forma de um índice de sujeira do lastro.

As interfaces da via são manifestadas como reflexões lineares nos dados do GPR e só ocorrerão onde houver uma diferença nas propriedades elétricas dos materiais de cada lado da fronteira, como entre uma camada de lastro limpo e o subleito ou lastro limpo e uma camada de lastro sujo. O índice de sujeira derivado do GPR é baseado na medição do nível de dispersão do sinal na camada de lastro e é independente da estratificação da camada de lastro.

A correlação dos dados do GPR com os dados do LiDAR pode permitir que as equipes de manutenção ferroviária tenham uma compreensão mais completa do estado da via e de suas áreas circundantes. Isso pode melhorar a eficiência da manutenção, reduzir riscos operacionais e ajudar a prevenir interrupções não programadas na operação ferroviária. Além disso, a capacidade de coletar e analisar dados em tempo real pode ser benéfica para a tomada de decisões rápidas e eficazes em situações de emergência.

A combinação do Ground Penetrating Radar (GPR) e dados de geometria da via ferroviária, juntamente com informações obtidas a partir de sensores como LiDAR, pode ser uma abordagem eficaz para o monitoramento e manutenção de ferrovias. Cada tecnologia tem suas próprias capacidades e aplicações específicas, e a integração delas pode fornecer uma visão mais completa e precisa do estado da via e de suas áreas adjacentes.

2.7. LiDar

O LiDAR é uma tecnologia que utiliza pulsos de laser para medir distâncias e criar modelos tridimensionais de superfícies. No contexto ferroviário, o LiDAR pode ser usado para mapeamento de geometria da via, monitoramento de vegetação pois pode ser usado para detectar a vegetação ao redor da via, identificando árvores e arbustos que possam representar riscos, como queda de árvores nos trilhos. E por último para mapeamento de infraestrutura uma vez que, ele pode mapear estruturas adjacentes à ferrovia, como pontes, túneis e edifícios, identificando quaisquer problemas que possam afetar a operação da via.

Tem abaixo um exemplo de local com histórico de problemas de geometria de via, nesse mesmo trecho tinha pontos com lastro medianamente contaminado e umidade elevado no lastro e na interface lastro x sublastro. Por meio da nuvem de pontos do LiDAR foi possível perceber que a plataforma não estava com o nivelamento adequado para o correto direcionamento da água superficial.

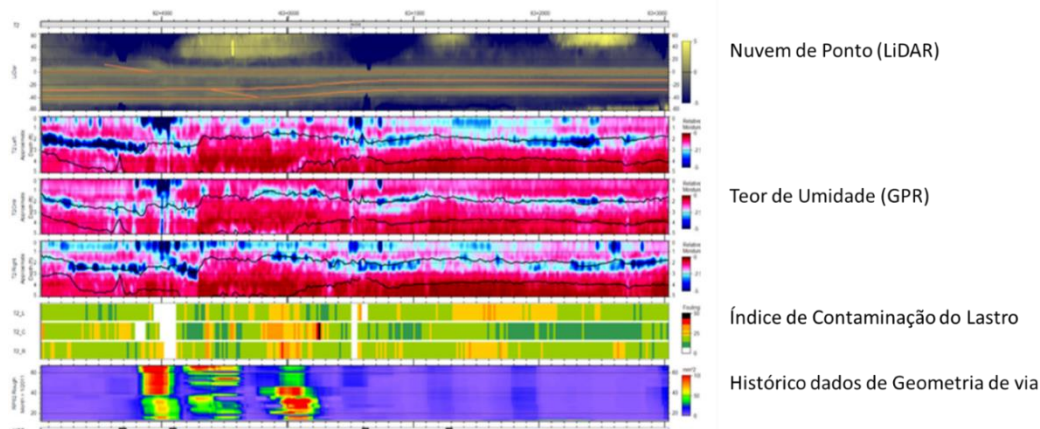


Figura 5. Cruzamento de dados com GPR e LiDar para análise de problema de drenagem e nivelamento da plataforma

2.8. Módulo de via

Estudos coordenados por Talbot (American Railway Engineering Association, 1918), quanto à análise de tensões na via permanente, introduziram o conceito de módulo de via (u), definindo-o como uma força pelo comprimento unitário que cada trilho requer para provocar uma deflexão unitária na via. Muitos fatores podem influenciar no valor do módulo de via e, entre os mais significativos têm-se: o tipo e as dimensões do dormente; o tipo, a espessura e a capacidade de suporte do lastro; e o tipo e a capacidade de suporte do subleito (Lundgren e Hay, 1970).

O módulo de via pode ser um modelo-base de previsão de desempenho da via permanente, pois através do mesmo é possível analisar a interação entre os componentes da superestrutura e da infraestrutura da via, provocada pela carga do material rodante e pelas deformações (Selig e Waters, 1994).

Diversos pesquisadores realizaram testes para análise de tensões e comportamento mecânico da via permanente, por meio do módulo de via (u). Entretanto, cada estudo tem condição e parâmetros de via particularizada como: tipo de vagão, carga aplicada e velocidade empregada nos testes; uso de diferentes dispositivos na medição da deflexão vertical, com posicionamento em locais distintos (alguns no patim do trilho, outros na borda do dormente, por exemplo); e metodologia específica de cálculo do módulo de via.

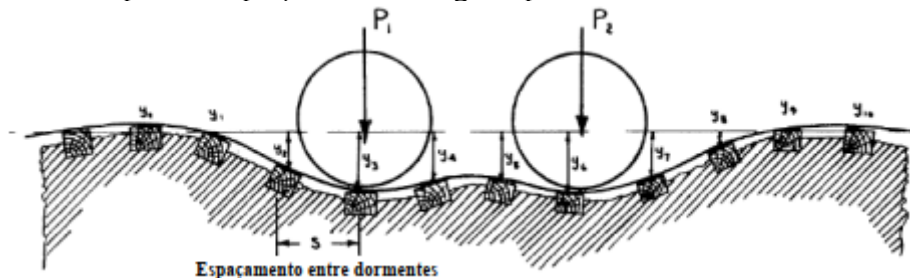


Figura 6. Deflexão na via por múltiplos carregamentos

Fonte: adaptado de LUNDREN et al. 1970

Os sensores ATT são instrumentos autônomos (sem cabos de alimentação ou transmissão) que detectam inclinação, vibração, tilte e temperatura das estruturas. Instalados em superfície e em profundidade média de 24 metros, que possibilitam obter a deflexão dinâmica com a passagem do trem em diferentes profundidades (lastro, sublastro, subleito).

2.5. Aerofotogrametria com drones

Aerofotogrametria é um levantamento topográfico que une imagens aéreas e matemática precisa. Tal tecnologia detecta ameaças como instabilidades no terreno. Essa técnica não apenas documenta o presente, mas também registra "mudanças históricas na infraestrutura ferroviária". Os recursos necessários: aeronaves ou drones, câmeras de alta resolução, GPS e softwares de processamento de imagem são essenciais para esta tarefa.

Esses dados são então analisados por especialistas e utilizados para gerar relatórios orientando decisões de manutenção e aprimoramentos na infraestrutura ferroviária.

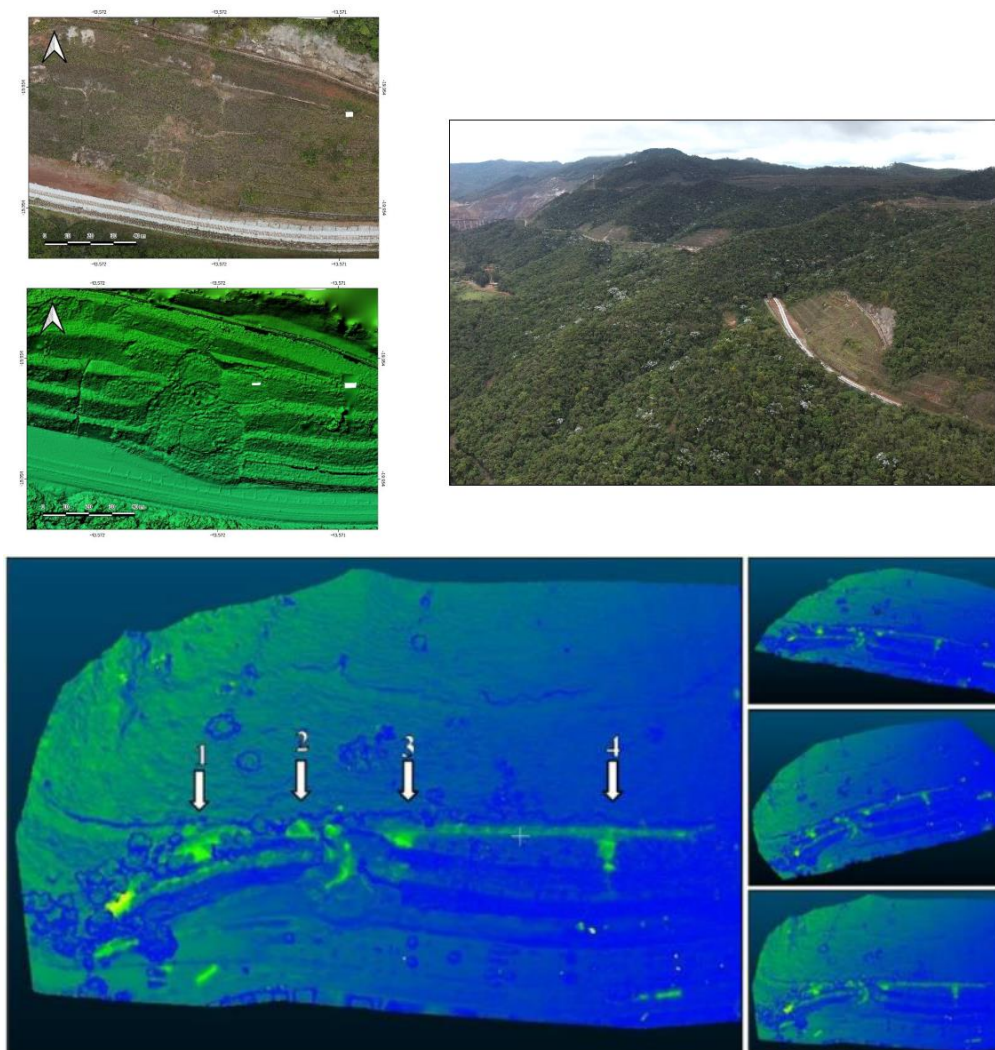


Figura 7. Estudos de Casos em taludes na AngloGold e EFVM (Ribas et al., 2022)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise abordou soluções inovadoras, destacando áreas críticas como o monitoramento geotécnico e a avaliação da integridade da plataforma. Diferentes tipos de instrumentação, equipamento ou monitoramento de diferentes componentes da infraestrutura ferroviária foram avaliados com base nos parâmetros obtidos e diferentes tipos de defeitos.

Muitos equipamentos se complementam de acordo com o tipo de cobertura de inspeção, principalmente os voltados para taludes. Por exemplo, os dados do InSAR observam o deslocamento do solo em grande escala e durante um longo período de tempo, detecta precursores de deslocamento antes da ocorrência dos eventos de ruptura do talude, enquanto monitoramento com os demais de pequena escala e pontuais com monitoramento em tempo real detecta as consequências reais na estrutura que está sendo monitorada.

A tecnologia voltada para plataforma ferroviária como o GPR e LiDar de forma complementar um ao outro identifica locais com necessidade de manutenção na plataforma correlacionados a problema de desnivelamento da geometria da via permanente, devido a problema de drenagem profunda, lastro contaminado e capacidade de suporte da plataforma.

Tabela 1. Matriz de Instrumentação, equipamento ou monitoramento

Componente	Instrumentação, equipamento ou monitoramento	Parâmetros Obtidos	Tipos de Defeitos	Cobertura da Inspeção
Lastro	GPR	Índice de contaminação de lastro Teor de umidade Profundidade da contaminação de lastro Profundidade de lastro e sublastro	Contaminação de lastro Bombeamento de finos	Larga Escala com as antenas embarcadas em um veículo ferroviário
Plataforma Ferroviária	LiDar	Perfil da camada superficial de lastro e seus entornos Drenagem	Problema de drenagem Nivelamento da via	
	LVDT	Deflexão elástica Módulo de via	Baixa capacidade de suporte da plataforma (sublastro e subleito)	Pequena Escala
	Indicador de Nível d'água	Nível d'água	Elevação do nível d'água (<1,5 m de profundidade)	Pontual
Taludes	InSar	Mapas de deformação Detecção de deslizamentos de Terra e subsidência	Deslizamento e deformação de taludes	Larga Escala
	Tiltmeter	Ângulo de Inclinação		Pontual
	Radares interferométricos baseados em Solo (Gbir)	Mapas de deformação Análise de taxa de feormação		Pequena Escala
	Estação Total Robótica (ETR)	Monitoramento de feormações	Deslizamento de taludes	Pequena Escala
	Aerofotogrametria com drones	Análise de deformação de taludes		Pequena Escala
	Piezômetro	Leitura de pressão hidráulica		Pontual

4. CONCLUSÃO

Em conclusão, a revisão abrangente das tecnologias e instrumentações destinadas ao monitoramento, análise e manutenção de taludes e plataformas ferroviárias destaca a evolução significativa nesse campo crucial da engenharia ferroviária.

A importância estratégica dessas tecnologias no cenário global das infraestruturas ferroviárias é evidente, pois desempenham um papel fundamental na preservação da segurança, eficiência operacional e durabilidade das vias férreas. A detecção precoce de movimentos de solo, a prevenção de deslizamentos e a manutenção eficaz da plataforma são aspectos vitais para garantir a operação segura e contínua dos sistemas ferroviários.

A busca por soluções inovadoras e integradas, que combinem diversos métodos de monitoramento, é crucial para proporcionar uma compreensão abrangente do comportamento dessas estruturas. À medida que a tecnologia avança, a aplicação prática dessas inovações em cenários ferroviários reais se torna imperativa.

Em última análise, a revisão destaca a importância contínua do investimento e da colaboração entre setores para impulsionar avanços na engenharia ferroviária. Ao enfrentar os desafios presentes e futuros, as tecnologias e instrumentações revisadas desempenharão um papel crucial na garantia de um futuro ferroviário mais seguro, eficiente e sustentável em escala global.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a VALE S.A. pela disponibilização dos dados.

6. REFERÊNCIAS

- Chowdhury, R., e Flentje, P. (2003) Role of slope reliability analysis in landslide risk management. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(1), 41–46. doi:10.1007/s10064-002-0166-1
- Fu, H., Chen, W., Fu, J. (2021). *Rock Mechanics and Engineering: Prediction and Control of Landslides and Geological Disasters*. 1ed. Elsevier, 407p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04623-7>
- Guilhot, D., Hoyo, T. M. del., Bartoli (2021) Internet-of-things-based Geotechnical Monitoring Boosted by Satellite INSAR Data. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs13142757>
- García-Delgado, H., Machuca, S., e Medina, E. (2019) Dynamic and geomorphic characterizations of the Mocoa debris flow (March 31, 2017, Putumayo Department, southern Colombia). *Landslides*, 16(3), 597–609. doi:10.1007/s10346-018-01121-3
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Ardizzone, F., e Galli, M. (2003) The impact of landslides in the Umbria region, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Science* (Vol. 3). Obtido de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299056>
- Mukenga, W., Havenith, H.-B., Eko, R. M., e Bissaya, R. (2017) Geotechnical Assessment of Potential Mass Movement Occurrence in a Zone at Risk Around Yaoundé-Cameroon. *Advancing Culture of Living with Landslides* (p. 455–463). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-53498-5_52
- Quang, L. H., Loi, D. H., Sassa, K., Takara, K., Ochiai, H., Dang, K., Abe, S., Asano, S., e Ha, D. N. (2018) Susceptibility assessment of the precursor stage of a landslide threatening Haivan Railway Station, Vietnam. *Landslides*, 15(2), 309–325. doi:10.1007/s10346-017-0870-3
- WANG, Shilei et al. State-of-the-art review of Ground Penetrating Radar (GPR) applications for railway ballast inspection. *Sensors*, v. 22, n. 7, p. 2450, 2022.
- Winter, M. G., Palmer, D., Sharpe, J., Shearer, B., Harmer, C., Peeling, D., e Bradbury, T. (2014) Economic impact assessment of landslide events. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment* (Vol. 1, p. 217–222). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-04999-1_28

- Wong, K. K., e Ho, T. K. (2004) Coast control for mass rapid transit railways with searching methods. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 151(3), 365–375. doi:10.1049/ip-epa:20040346
- Xu, Q., e Zhang, L. (2010) The mechanism of a railway landslide caused by rainfall. Landslides, 7(2), 149–156. doi:10.1007/s10346-010-0195-y
- Uchimura, T.; Towhata, I.; Wang, L. Miniature ground inclinometer for slope monitoring. In Proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hong Kong, China, 23–27 May 2011.
- Artese, G.; Perrelli, M.; Artese, S.; Meduri, S.; Brogno, N. POIS, a low cost tilt and position sensor: Design and first tests. Sensors 2015, 15, 10806–10824. [CrossRef]
- Li, C.; Azzam, R.; Fernández-Steeger, T.M. Kalman filters in geotechnical monitoring of ground subsidence using data from MEMS sensors. Sensors 2016, 16, 1109. [CrossRef]
- Zhu, J.; Wang, W.; Huang, S.; Ding, W. An improved calibration technique for mems accelerometer-based inclinometers. Sensors 2020, 20, 452. [CrossRef]
- Towhata, I.; Uchimura, T.; Seko, I.; Wang, L. Monitoring of unstable slopes by MEMS tilting sensors and its application to early warning. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2015, 26, 012049. [CrossRef]

REVIEW OF TECHNOLOGIES AND INSTRUMENTATIONS FOR SLOPE AND RAILWAY PLATFORM

Abstract

This article addresses the current state of technologies and instrumentation used in the monitoring, instrumentation, and maintenance of slopes and railway platforms. The research aims to provide a comprehensive overview of the methodologies employed to ensure the stability and safety of these structures, which are fundamental to railway infrastructure. Throughout the article, various innovative technologies applied to slope analysis are discussed, ranging from traditional methods to cutting-edge solutions. Geotechnical monitoring, for example, is highlighted as a critical area, with modern sensor systems and geotechnical instrumentation playing a crucial role in the early detection of soil movements and potential landslides. The railway platform, another central element in this context, is examined regarding the challenges faced in its maintenance and stability. The article explores innovative technologies for assessing platform integrity, considering aspects such as leveling, deformation, and degradation. Additionally, the review presents case studies and practical applications of these technologies in real railway scenarios. The importance of integrated approaches that combine different methods to provide a comprehensive understanding of slope and platform behavior is emphasized. The conclusion of the article underscores the ongoing need for research and development in this field, aiming to enhance existing technologies and develop new solutions to address emerging challenges in the effective management of slopes and railway platforms. Ultimately, the review highlights the strategic importance of these technologies in ensuring the safety, operational efficiency, and durability of railway infrastructures worldwide.

Keywords: Instrumentation; Geotechnical monitoring; Infrastructure railway.