

APLICAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE TALUDES FERROVIÁRIOS EM REGIÃO TROPICAL

Marcos Massao Futai, Professor da Escola Politécnica da USP, Brasil

Luciano de Oliveira, Engenharia Civil, Vale S.A., Brasil

Luiz Felipe Goulart Fiscina, Doutorando, Escola Politécnica da USP, Brasil

Renata Pacheco Quevedo, Doutora, Escola Politécnica da USP, Brasil

Marcos Timóteo Rodrigues de Sousa, Doutor, Escola Politécnica da USP, Brasil

Gabriel Raykson Matos Brasil de Araújo, Eng. Civil, Escola Politécnica da USP, Brasil

Bernardo Lopes Poncetti, Doutorando, Escola Politécnica da USP, Brasil

Leandro Silva de Assis, Doutorando, Escola Politécnica USP, Brasil

Rodrigo Moraes Silveira, Professor da UFPR, PUCPR, GeoInfraUSP, Brasil

João Alberto de Andrade, Eng. Civil, Vale S.A., Brasil

João Paulo Monticelli, Doutorando, Escola de Engenharia de São Carlos USP, Brasil

Silvia Suzuki, Eng. Civil, GeoInfraUSP, Brasil

Tiago Borges da Silva, Doutorando, Escola Politécnica da USP, Brasil

RESUMO

Este artigo apresenta tecnologias emergentes para inspeção, monitoramento e análise de taludes na Estrada de Ferro Carajás (EFC), desenvolvidas no projeto de pesquisa da Cátedra Under Rail da VALE. Utiliza-se um mapa de susceptibilidade de deslizamentos com dados de sensoriamento remoto e monitoramento por InSAR e drones LiDAR. Os taludes críticos são caracterizados e monitorados com instrumentação remota, fibra óptica e sensores de baixo custo, seguindo a metodologia em desenvolvimento no GeoInfraUSP. Será estudado o comportamento presente e futuro com simulações numéricas considerando o efeito da vegetação, da infiltração e das mudanças climáticas. A metodologia em desenvolvimento poderá ser estendida para outras ferrovias.

Palavras-chaves: Inspeção, Monitoramento, Taludes, Ferrovia, Mudanças Climáticas.

1. INTRODUÇÃO

Os escorregamentos causam prejuízos econômicos, sociais, ambientais e até perdas de vida (Froude e Petley, 2018). A ocupação de áreas com relevo acidentado e os efeitos das mudanças climáticas, incluindo o aumento da frequência na ocorrência de eventos extremos, têm intensificado a ocorrência dos escorregamentos (Wang et al., 2023). No caso de obras lineares, como ferrovias, sempre há trechos de cortes e aterros que estão sujeitos a desastres associados com deslizamentos (Palin et al., 2021).

A Estrada de Ferro Carajás (EFC) possui 892 km de extensão, ligando a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo, em Carajás, no sudeste do Pará, ao Porto de Ponta da Madeira, em São Luís, no Maranhão. Ao longo do traçado da EFC, diversas litologias são interceptadas, expondo diferentes tipos de litotipo, relevos e feições

geológicas, que, juntamente com eventos de precipitação extrema, têm gerado eventos geológico-geotécnicos, como erosões e movimentos de massas (Figura 1). Consequentemente, transtornos logísticos são observados corriqueiramente, como interrupções e manutenções excessivas.



Figura 1. Movimentos de massa ao longo da EFC (Acervo pessoal: J.A. de Andrade, 2024).

Além dos prejuízos materiais, a paralisação de uma linha férrea pode gerar prejuízos econômicos (Thaduri et al., 2021). A paralisação para a manutenção de um trecho afetado por deslizamentos de terra pode resultar em dias de interrupção do fluxo normal de abastecimento e fornecimento de insumos para diversas regiões do país, além de impactar a exportação de materiais, diminuindo a credibilidade e reputação dos agentes econômicos. Nesse sentido, se faz necessário tornar a via mais resiliente a possíveis danos oriundos de processos erosivos e escorregamentos causados por chuvas ou intervenções antrópicas, incluindo uma visão estratégica de efeitos futuros das mudanças climáticas. O projeto de pesquisa “Metodologia para avaliação de risco de escorregamentos que causam danos à ferrovia” faz parte da Cátedra *Under Rail* da VALE e tem desenvolvido suas atividades de pesquisa utilizando novas tecnologias de inspeção, monitoramento e análise que serão aplicadas na EFC nos próximos quatro anos.

O objetivo do projeto é desenvolver metodologias de avaliação de estabilidade de taludes ferroviários utilizando tecnologias e análises inovadoras. Para tal, serão desenvolvidas as seguintes atividades: (a) mapeamento suscetibilidade a escorregamentos ao longo de um trecho da EFC, associando métodos convencionais e dados existentes com sensoriamento remoto e monitoramento com interferometria por radar (InSAR); (b) realização de inspeção e monitoramento sem contato para melhorar a qualidade das informações e garantir a segurança de inspetores; (c) entender o comportamento do solo, rocha, causas de escorregamentos, e classificar os movimentos de massa; (d) estudar os efeitos das mudanças climáticas e eventos extremos de chuva nos escorregamentos; (e) utilizar sensores de baixo custo, Internet das Coisas (*IoT*), computação de borda, inteligência artificial e outras ferramentas da transformação digital no estudo da estabilidade de taludes; (f) monitorar e estudar um talude experimental em condições controladas e aplicar a um caso na EFC; (g) monitorar e analisar um modelo físico ou um talude experimental sob condições controladas, visto que é necessário testar e calibrar os equipamentos antes da aplicação na EFC; (h) desenvolver uma metodologia de aplicação prática que define quando e como fazer a análise de risco global de grandes áreas, em regiões e estudos de estabilidade detalhados em um talude específico.

As tecnologias, métodos e demais atividades descritas acima foram temas de apresentações no 1º *Workshop* de Estabilidade de Taludes, conduzido nos dias 13 e 14 de Março na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Este artigo é uma síntese das apresentações e todos os autores deste artigo foram palestrantes no *Workshop*.

2. USO DE SATÉLITES E DRONES PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE SUSCETIBILIDADE

A definição dos taludes críticos será feita em uma primeira etapa do projeto que visa a elaboração de um mapa de suscetibilidade para toda a extensão da EFC, utilizando imagens de satélites. Além disso, será realizado o cadastramento da ferrovia por meio de coordenadas aferidas por GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e posteriormente cadastrados usando geoprocessamento em um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Com isso, será possível criar um inventário das ocorrências como também criar um Modelo Digital de Superfície (MDS), a partir do qual será possível extrair dados topográficos, como a declividade dos taludes e o direcionamento do fluxo de água ao longo do trecho avaliado. Métodos que utilizam o MDS para avaliação de áreas suscetíveis como o Stability Index Mapping (SINMAP), o Shallow Landslide Stability Model (SHALSTAB) e o Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model (TRIGRS) viabilizam resultados confiáveis para a predição de escorregamentos (Bordoni et al., 2015; Melo & Kobiyama, 2018; Michel et al., 2014; Nery & Vieira, 2015) e poderão ser utilizados nesse projeto para mapeamento das zonas críticas ao longo da ferrovia.

Considerando-se a resolução espacial de imagens de satélite disponibilizadas gratuitamente, como LANDSAT (30 m) e Sentinel (10 m), alguns detalhes das cicatrizes de escorregamento e danos a sistemas de contenção ou drenagem podem não ser captadas no levantamento inicial. Para contornar esse obstáculo, serão usadas tecnologias de diversos sensores: RGB, Termal e LiDAR, embarcados em drones (como por exemplo o DJI Matrice 300 RTK, já disponível no laboratório GeoinfraUSP - Figura 2), que serão utilizados para inspecionar e monitorar áreas específicas indicadas pelo sensoriamento remoto de satélites, que necessitem de detalhamento para retroalimentar o mapa de suscetibilidade. Com essas tecnologias será possível detalhar Modelos Digitais de Terreno (MDT) com informações de cor (RGB), forma (RGB, LiDAR, Termal) e texturas (LiDAR), podendo gerar curvas de nível do solo (sem interferência de vegetação) e mapas de declividade (Giordan et al, 2020). Com sensores termais é possível levantar informações de classificação do maciço rochoso (Franzosi et al, 2023) com resolução centimétrica. Dessa forma, tem-se o mapa de susceptibilidade da região com elevada resolução para posterior análises de estabilidade e desempenho temporalmente.

Para criar um mapa de suscetibilidade, além dos dados citados, é essencial coletar informações sobre geologia, hidrologia, vegetação e climatologia. Esses dados também podem ser obtidos por meio de sensoriamento remoto e bancos de dados disponibilizados por agências brasileiras (ANA, CPRM, IBGE, INPE, etc.). Em seguida, esses dados devem ser analisados e ponderados de acordo com sua influência na ocorrência do evento, podendo ser integrados por meio de técnicas geoespaciais, como análise multicritério e modelagem de dados para gerar um modelo de susceptibilidade. Este modelo deve ser validado com dados históricos para, então, ser utilizado para criar um mapa representativo de susceptibilidade da ferrovia.



Figura 2. DJI Matrice 300 RTK.

3. USO DA TECNOLOGIA InSAR (*INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR*) PARA CALIBRAÇÃO DO MAPA DE SUSCETIBILIDADE

As técnicas de InSAR permitem a geração de informações sobre a deformação do terreno, permitindo o monitoramento da superfície terrestre (Vinuela et al., 2022). Neste projeto, os resultados do processamento InSAR serão utilizados para calibrar os mapas de suscetibilidade, a partir da inclusão de informações sobre movimentos de massa ativos em taludes próximos à EFC. As imagens de Synthetic Aperture Radar (SAR) são compostas por amplitude e fase, os quais permitem diferentes processamentos e análises, como polarimetria e InSAR (Tessari et al., 2017).

O princípio básico de InSAR está baseado na emissão de sinais do sensor SAR satelital e o recebimento da energia refletida pela superfície terrestre. A partir de uma análise temporal, ou seja, duas ou mais passagens do satélite, a fase é medida de acordo com a diferença entre o objeto analisado (neste caso, os taludes da EFC) e o satélite (Figura 3) (Piroton et al., 2020).

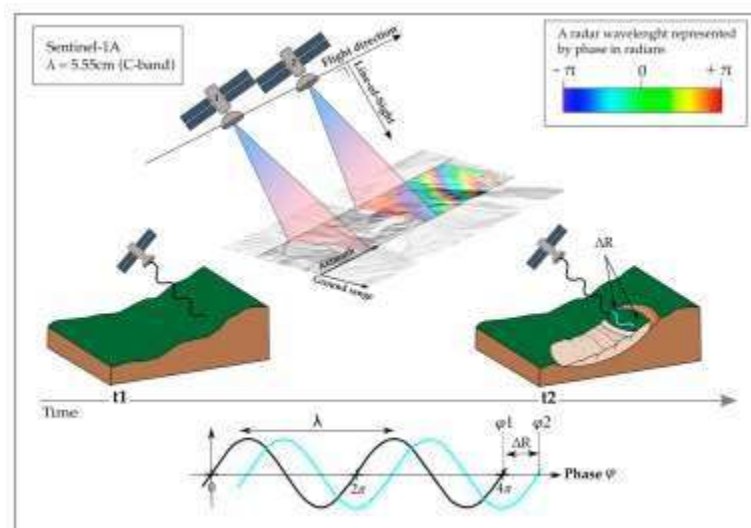


Figura 3. Geometria de uma imagem SAR e princípio InSAR durante duas passagens sucessivas (t1 e t2) do satélite sobre a mesma área, neste caso, uma antes e uma depois da ativação de um movimento de massa. Fonte: Piroton et al. (2020).

Assim, com InSAR é possível detectar mudanças milimétricas na superfície, permitindo o monitoramento de movimentos do solo, deformações da crosta terrestre, subsidência, atividade vulcânica e outros fenômenos geológicos e ambientais. Essa técnica é valiosa para uma ampla gama de aplicações, incluindo estudos geotécnicos,

monitoramento de infraestrutura, gestão de recursos hídricos e prevenção de desastres naturais.

4. CARACTERIZAÇÃO HIDRO-GEOTÉCNICA E ENSAIOS ESPECIAIS

Após definição dos taludes críticos com base nas metodologias citadas anteriormente, uma extensa campanha de investigação geotécnica será executada para elucidar o comportamento em termos de fluxo e resistência ao cisalhamento dos materiais dessas geoestruturas. Dentre os métodos de investigação, destacam-se os ensaios *in situ* tradicionais (CPTu, DPL, SPT e Geofísica) e os ensaios de laboratório, a partir da retirada de amostras indeformadas. O conhecimento do comportamento dos solos é fundamental para realizar análises mais realistas e confiáveis. A definição do modelo geomecânico, das condições hidrogeológicas e de fluxo, dos modelos constitutivos e dos parâmetros geomecânicos são a base para a realização de simulações computacionais para verificar as condições de estabilidade dos taludes decorrente da interação solo-atmosfera. Além dos ensaios *in situ*, está prevista a utilização de ensaios geofísicos que auxiliarão na determinação do contato solo-rocha, extrapolação da estratigrafia, identificação do nível freático e demais características a serem definidas ao longo da pesquisa e do conhecimento da região.

Complementarmente, ensaios especiais para a previsão do comportamento não saturado do solo (tanto em termos de curva de retenção de água no solo como em fluxo não saturado e resistência ao cisalhamento) serão realizados na região para os taludes que possuem material nesse estado. Esses ensaios são essenciais para a avaliação de estabilidade de um talude não saturado. Segue abaixo alguns exemplos de aplicação:

- **Curva de Retenção de Água:** A curva de retenção de água fornece informações sobre como a umidade do solo varia com o potencial matricial. Essa informação é essencial para compreender como a água presente no solo afeta suas propriedades de resistência e coesão. Um solo saturado pode ter uma resistência reduzida devido à diminuição da coesão, o que pode levar a falhas no talude;
- **Condutividade Hidráulica Não Saturada:** A condutividade hidráulica não saturada é importante para entender como a água se move dentro do talude. Se a água infiltrar no talude, ela pode aumentar a pressão intersticial e reduzir a resistência do solo. A condutividade hidráulica não saturada influencia a taxa e a direção do fluxo de água no solo, o que é crucial para a estabilidade do talude.

Vale ressaltar que os ensaios clássicos para a medição de parâmetros não saturados do solo são considerados lentos e de difícil execução. Para contornar esse problema e aumentar a produtividade de coleta de dados oriundos de ensaios laboratoriais, equipamentos de última geração foram importados ou estão em processo de aquisição. Segue abaixo a lista de alguns deles (Figura 4): (a) DYN-TTS + *Unsaturated Triaxial Testing of Soil* (Fabricante: GDS): permite conduzir ensaios triaxiais estáticos e dinâmicos em solos saturados e não saturados; (b) HYPROP2 (Fabricante: Meter): capaz de traçar a curva de retenção do solo com medição de sucção no intervalo de 0 a 100 kPa e fornecer a condutividade hidráulica não saturada do solo; (c) WP4C (Fabricante: Meter): permite traçar a curva de retenção do solo com medição sucção no intervalo de 0,1 MPa a 300 MPa; (d) KSAT (Fabricante: Meter): medição da condutividade hidráulica saturada dos solos; (e) Fredlund SWCC Device (Fabricante: GCTS): Obtenção da curva de retenção completa (curva de secagem e umedecimento) a partir da técnica de translação de eixos.

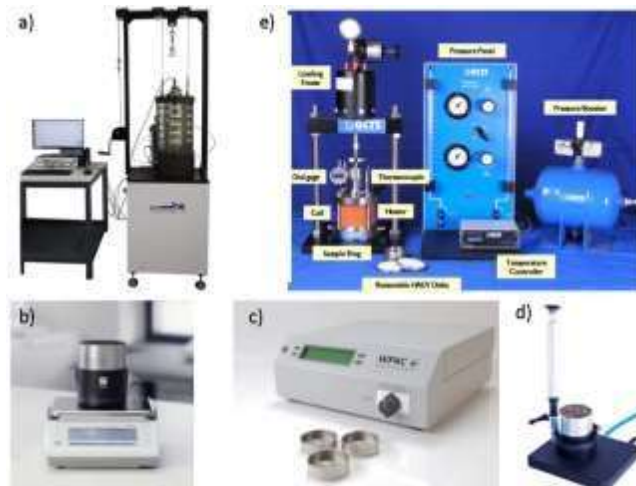


Figura 4. a) DYNTTS b) HYPROP2 c) WP4C d) KSAT e) Fredlund SWCC Device.

A formação geológica que originou os solos das encostas naturais, taludes de corte e material de aterro que ocorrem ao longo da EFC, e estão relacionados com problemas de escorregamentos, precisa ser melhor entendida quanto sua mineralogia e microestrutura. Assim, além dos ensaios mecânicos e de condutividade hidráulica, serão realizados ensaios de difração de raio X, microscopia eletrônica de varredura, petrografia e outros ensaios físico-químicos.

5. MONITORAMENTO REMOTO, USO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO E UTILIZAÇÃO DE FIBRA ÓTICA

O monitoramento geotécnico convencional com medidas geodésicas para medir deslocamentos e o uso de instrumentos geotécnicos (piezômetros, células de pressão, indicadores de nível d'água, extensômetros) com leitura manual, usam o princípio da indústria 2.0. A evolução tecnológica permitiu a automação de sistemas e nos últimos anos é possível também receber os dados em tempo real. Na era da indústria 4.0, há disponíveis sensores de baixo custo que, associados com os princípios de internet das coisas (IoT), permitem desenvolver sistemas específicos, baratear os custos e assim, ampliar o número de encostas monitoradas em um ativo linear, como é o caso das ferrovias.

Dessa forma, paralelamente à investigação geotécnica de campo e à execução dos ensaios laboratoriais, será desenvolvida uma metodologia para o monitoramento de taludes com base em tecnologias inovadoras. Além dos instrumentos geotécnicos tradicionais para avaliar as variações de deslocamentos e pressões hidrostáticas no interior do maciço é possível usar mais tecnologia embarcada optando por inclinômetros do tipo IPI ou ShapeArray, piezômetros e tensiômetros elétricos com a possibilidade de envio de dados remotos.

Também serão instalados sensores de baixo custo desenvolvidos pelo laboratório GeoInfraUSP. O projeto de sensores de baixo custo busca desenvolver sistemas otimizados para o monitoramento de taludes utilizando sensores MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), em conjunto com microcontroladores que possibilitam a implementação de IoT, seguindo modelos atualizados como os que podem ser encontrados na literatura internacional (Gamperl et al., 2021; Vergote, 2021; Komarizadehasl et al., 2022; Marino et al., 2023). Até o momento, foram realizadas as etapas de seleção dos componentes, testes de sensores e criação de rotinas de aquisição e

envio de dados para para o monitoramento remoto de aceleração e inclinação com sensores triaxiais, medição do teor de umidade volumétrico com sensores capacitivos e resistivos, e poro pressão com sensores de pressão absoluta.

O projeto visa a construção de ilhas de sensoriamento remoto de baixo consumo energético. Cada ilha pode ser composta por uma combinação de sensores de aceleração, inclinação, umidade do solo e/ou pressão, aquisitados por microcontroladores ESP32. Os sistemas em desenvolvimentos são versáteis quanto ao envio de dados, possibilitando tanto o uso da tecnologia LoRa para comunicação a longas distâncias, quanto o uso de protocolos com maior capacidade de envio como ESPNOW e WIFI, sendo adaptáveis a diferentes casos (Figura 5).

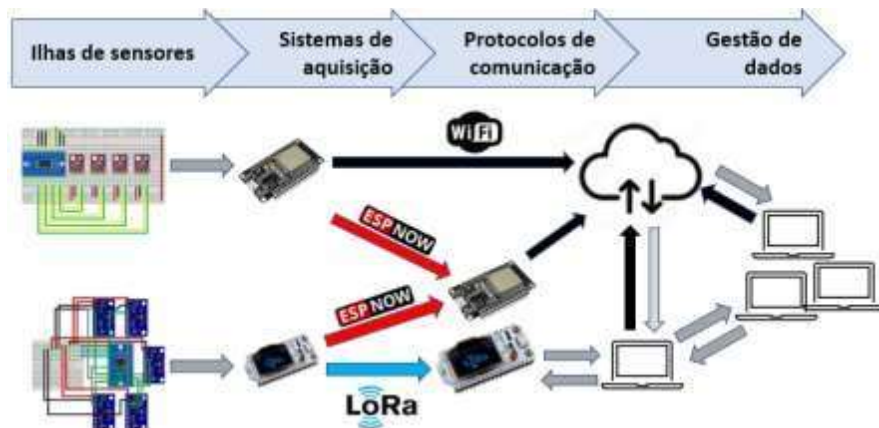


Figura 5. Sistema de monitoramento remoto de baixo custo.

Além da construção de um modelo próprio, foram realizadas simulações de escorregamento em calha experimental utilizando um sistema de monitoramento com sensores de baixo custo montado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e seu desempenho foi comparado ao de acelerômetros comerciais.

As simulações foram realizadas instrumentando 4 pontos de um modelo físico que utilizou solo coesivo como matriz de escorregamento, induzindo um escorregamento do tipo planar através de uma camada de brita. O modelo buscou respostas do sensor na condição de instalação em camada fixa e camada mobilizada, tentando entender a resposta do sensor em possíveis cenários da natureza. Preliminarmente, verificou-se que os acelerômetros responderam bem aos movimentos de massa dentro do modelo, identificando pequenas variações de velocidade provocadas pela formação de trincas na camada, rupturas no maciço e mudanças de angulação da calha. A Figura 6 apresenta a calha experimental, o modelo físico e um gráfico com resultados preliminares de um dos ensaios realizados.

A utilização das tecnologias digitais apresentam uma acentuada tendência de crescimento, com destaque para a utilização de satélites, radares ou tecnologias embarcadas, associadas a ferramentas de SIG, como as ferramentas mais recorrentes.

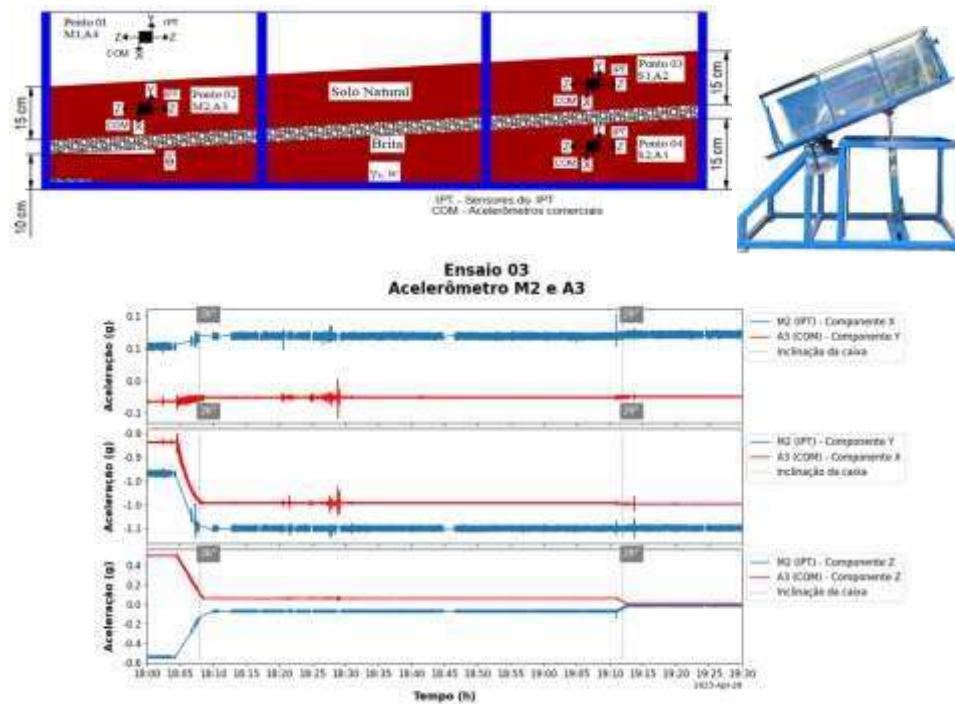


Figura 6. Calha experimental, modelo físico ensaiado e resultados preliminares.

As publicações têm sido lideradas pela China e Itália, em uma lista de 63 países identificados. Foram utilizados sensores MEMS de baixo custo contendo acelerômetro e giroscópio montado pelo IPT e acelerômetros MEMS de fabricação comercial para efeito comparativo de desempenho.

Quanto às simulações de escorregamentos realizadas, os resultados indicaram que os sensores de baixo custo apresentaram a mesma tendência geral no comportamento dos sinais registrados que os sensores comerciais. Os acelerômetros foram capazes de identificar movimentações prévias à ruptura com horas de antecedência nos pontos instrumentados, enquanto os giroscópios nada identificaram. Além disso, os acelerômetros também foram capazes de identificar as movimentações angulares da caixa de simulação. No mais, o acelerômetro mostrou resultados satisfatórios para uma eventual incorporação aos sistemas de monitoramento e alerta de escorregamentos, apresentando tempo de resposta satisfatório para tomadas de decisão emergenciais. Estudos mais detalhados sobre a escolha dos sensores de baixo custo, focados em qualidade dos resultados e interpretação dos dados para fins práticos estão em desenvolvimento.

Finalmente, além de técnicas de monitoramento geotécnico remoto e a aplicação de sensores de baixo custo, haverá também o monitoramento com fibra óptica, ou seja, uma instrumentação baseada na tecnologia de fibra óptica distribuída, focada no monitoramento e na avaliação do comportamento geotécnico de encostas.

A indústria de fibra óptica teve um desenvolvimento significativo a partir do final dos anos 80. Além da comunicação, esta tecnologia também está sendo utilizada para monitoramento de deformação, deslocamento, aceleração, pressão, temperatura e propriedades químicas entre outros. Os sistemas de monitoramento distribuído de fibra óptica se tornaram significativamente populares em aplicações geotécnicas, pois podem fornecer medições distribuídas de tensão e temperatura com alta precisão ao longo de qualquer área monitorada. Dentre as vantagens tecnológicas do uso de sensores de fibra óptica, destacam-se: (i) detecção da possibilidade de vários sinais em uma única fibra óptica (multiplexação de dados), (ii) facilidade de leitura dos sinais (sinal de bom valor

versus ruído), (iii) medições a longas distâncias (detecção remota), (iv) imunidade a campos eletromagnéticos, (v) ausência de faísca, e (vi) baixo peso e baixa reatividade do material.

A utilização de fibra óptica como ferramenta para diferentes tipos de monitoramento geotécnico pode se tornar altamente atrativa e econômica quando comparada a instrumentos convencionais de monitoramento. Um único cabo de fibra óptica pode abranger uma área de monitoramento maior em comparação com a instrumentação convencional, e a possibilidade de monitorar mais de uma grandeza física com o mesmo cabo de fibra óptica.

Consultando a literatura é possível encontrar vários exemplos diferentes, onde os sistemas distribuídos de fibra óptica estão sendo utilizados para monitoramento de encostas (Zhu et al., 2012 e 2016), túneis (Klar et al., 2010; Hauswirth et al., 2014), movimentos de massa (Iten et al., 2008), monitoramento de encostas (Zhang et al., 2015), elementos estruturais geotécnicos como fundações (Xing et al., 2012) e aterros (Chen et al., 2016). Para isso, o interrogador, o cabo sensor óptico e a técnica de instalação devem ser ajustados adequadamente para garantir a qualidade dos resultados da medição.

Analogamente aos sensores convencionais, uma curva de calibração do sensor é necessária para derivar os valores de deformação da quantidade de medição de frequência. No entanto, os fabricantes de cabos sensores de fibra óptica muitas vezes não fornecem seus próprios parâmetros de calibração e consultam os valores na literatura especializada, o que pode resultar em erros no monitoramento (Moser et al., 2016).

A frequência de Brillouin detectada pelo monitoramento com a tecnologia de fibra óptica depende linearmente da deformação longitudinal e da temperatura. Portanto, a mudança na frequência de Brillouin detectada entre duas medições é uma função das variações de tensão e temperatura. Essas funções são determinadas introduzindo os coeficientes lineares de deformação e temperatura para algumas derivações parciais.

O princípio de medição do sensoriamento distribuído de deformação da fibra óptica é baseado no fato de que após enviar um pulso de luz por uma fonte de luz poderosa (laser) em uma fibra de vidro, uma proporção muito pequena dessa luz é retroespalhada em cada ponto ao longo da fibra. A luz espalhada sofre uma mudança de frequência, chamada de mudança de frequência de Brillouin, que depende da tensão e das variações de temperatura. A luz espalhada sofre uma mudança de potência, chamada de mudança de potência Raman, que depende das variações de temperatura.

A seção analisada da fibra óptica é determinada com o sistema Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) comercialmente disponível e Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA).

A detecção distribuída fornece um método direto de medição das mudanças na tensão e temperatura ao longo de todo o comprimento de uma fibra óptica. Um novo módulo BOTDR baseado em espalhamento espontâneo de Brillouin já está disponível. Este módulo complementa nossa linha de produtos Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA). Mesmo que haja uma ruptura em algum lugar da fibra, esta unidade ainda pode medir tensão/temperatura até o ponto da ruptura. O sistema BOTDR está disponível como uma unidade autônoma ou combinado em um sistema de medição duplo BOTDA/BOTDR.

Com o conhecimento da velocidade da luz no material é possível identificar o espectro de Brillouin correspondente a cada seção. A unidade de leitura usada nos testes de laboratório, chamada DSTS (Distributed Strain and Temperature Sensors), registra as porções de luz Stokes e anti-Stokes do espectro de Brillouin, deslocamento e potência. A

análise desses dados permite a avaliação de deformação e temperatura ao longo do cabo de fibra óptica.

6. ANÁLISES NUMÉRICAS CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO-CLIMA E O EFEITO DA VEGETAÇÃO

Com os dados disponíveis do talude crítico (caracterização e monitoramento) será possível modelar o seu comportamento atual, levando em conta diferentes tipos de análises como: análises de infiltração com interação solo-atmosfera (Software Seep/W - Geostudio) e análises por equilíbrio limite (Software Slope/W - Geostudio) com variação de sucção. Em termos de fluxo de água, o software Seep/W aplica equação de Richards (1931) derivada da lei de Darcy, em função da sucção do solo. Para se levar em conta a sucção na resistência ao cisalhamento na estabilidade de taludes em solos não saturados, o software Slope/W aplica tanto a equação de Fredlund et al. (1978) como também a equação de Vanapalli et al. (1996). Esta utiliza os parâmetros de coesão e ângulo de atrito efetivo do solo em análise em conjunto com a curva de retenção volumétrica de água. Para mais detalhes acerca dos equacionamentos citados acima, consultar os manuais do software Geostudio (GEO-SLOPE, 2018a e 2018b). Por último, a infiltração efetiva no maciço depende do balanço hídrico solo-atmosfera. O software SEEP/W utiliza a seguinte equação para o balanço de água na superfície do terreno:

$$q_p \times \cos \alpha + q_e + q_r = q_i \quad (1)$$

Onde, q_p é precipitação total, α é a inclinação do talude, q_e é a evaporação total, q_r é o escoamento superficial (ou runoff) e q_i é a taxa de infiltração líquida que penetra de fato no talude alterando as poropressões no maciço. Vale ressaltar que durante eventos de chuvas, a evaporação pode ser considerada igual a zero.

Simulações considerando o efeito de infiltração em encostas e em estruturas de solo reforçado podem ser visualizadas nos trabalhos de Zambrana (2017) e Albino, Portelinha e Futai (2020), respectivamente. Alguns produtos típicos que podem ser extraídos dessas simulações são: o balanço hídrico do maciço ao longo do tempo e a flutuação tanto das poropressões como dos fatores de segurança ao longo do período analisado (Figura 7). Finalmente, o efeito da vegetação presente no talude também poderá ser modelado de forma a verificar o aumento da resiliência da geoestrutura contra rupturas superficiais.

Em resumo, os efeitos da vegetação na estabilidade de taludes podem ser classificados como de natureza mecânica ou hidrológica. Os fatores mecânicos nascem a partir de interações físicas do sistema de folhagem e/ou da raiz na interface solo/planta. Os fatores hidrológicos são aqueles intrínsecos ao ciclo hidrológico existente quando a vegetação está presente (Greenway, 1987). Em termos mecânicos, as raízes de uma proteção vegetal, na superfície de um talude, podem oferecer uma resistência ao cisalhamento adicional ao solo (Rahardjo, Satyanaga e Leong, 2011):

$$\tau = C + (\sigma - u_a) \tan \varphi' \quad (2)$$

$$C = c' + \tan(u_a - u_w) \tan \varphi^b + c_r \quad (3)$$

$$c_r = T_R \left(\frac{A_R}{A} \right) (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi) \quad (4)$$

Onde: C = coesão total (kPa); c' = coesão efetiva do solo (kPa); u_a = pressão atmosférica (kPa); u_w = pressão hidrostática; φ_b = parâmetro que quantifica um aumento na resistência devido a um aumento na sucção (u_a-u_w); φ' (graus) = ângulo de atrito efetivo do solo; c_r = coesão devido ao efeito das raízes no solo (kPa); T_R = resistência à tração das raízes (kPa); A_R/A = área da superfície de cisalhamento ocupadas pelas raízes, por unidade de área; θ = ângulo de distorção das raízes em relação ao eixo vertical (graus).

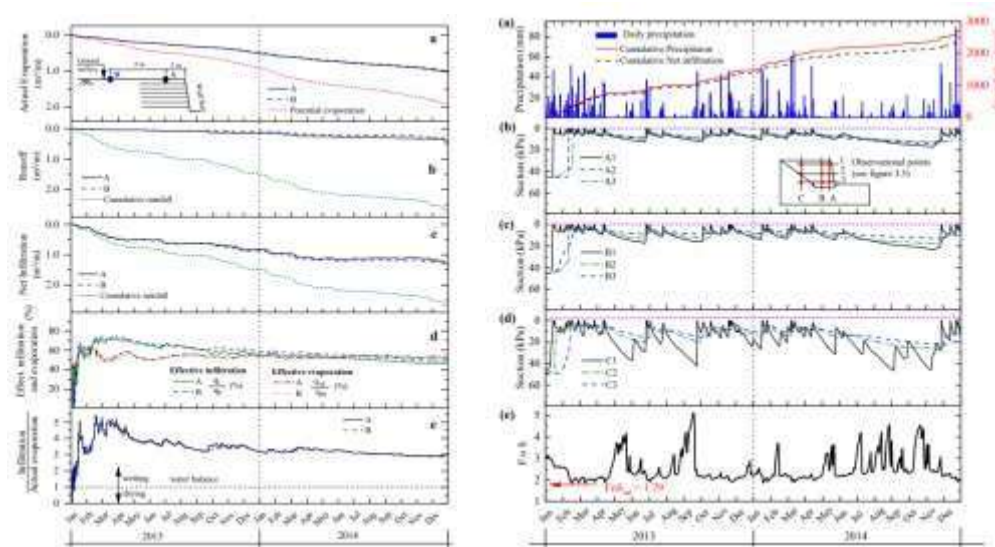


Figura 7. Balanço hídrico ao longo de 2 anos climáticos (esquerda) e flutuação das poropressões ao longo do mesmo período (direita) em uma estrutura de solo reforçado (Albino, Portelinha e Futai, 2020).

De acordo com Rahardjo, Satyanaga e Leong (2011), a seleção da vegetação para proteção de taludes depende da condição hidrogeológica dele, como: intensidade de chuvas na região, propriedades do solo, temperatura e taxa de evaporação. Conforme esses autores, a vegetação mais utilizada na proteção de taludes são as do tipo Vetiver e Orange Jasmine. Como forma de avaliar o desempenho dessas duas vegetações na estabilidade de taludes tropicais foram conduzidos ensaios de campo, instrumentados, para tal. Tanto a grama Vetiver como o arbusto Orange Jasmine foram plantados em um talude situado em Tampines, Singapura. Foram instalados tensiômetros e piezômetros para avaliação da evolução da pressão hidrostática no solo bem como a flutuação do nível freático em períodos chuvosos, além de pluviômetros para registro da intensidade e frequência das chuvas. Os instrumentos foram instalados em 3 seções: (1) na região onde foram plantadas a grama do Vetiver (2) na região onde foram plantadas o arbusto Orange Jasmine e (3) na região do talude natural.

Análises de estabilidades utilizando o método de coesão total (Fredlund et al., 1978) foram conduzidas para avaliar a flutuação do fator de segurança durante os meses que foram coletados os dados de campo. Foi possível notar que o fator de segurança no talude sem cobertura vegetal caiu consideravelmente nos períodos de chuva (de 1,95 para 1,55), enquanto as regiões cobertas por Vetiver ou Orange Jasmine mantiveram-se com seus fatores de segurança praticamente constantes (~1,95). Dessa forma, pode-se concluir que a cobertura vegetal é eficaz para minimizar a infiltração de água dentro do solo e,

consequentemente, evitar a perda de resistência ao cisalhamento do solo não saturado durante eventos de precipitação.

7. AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ESTABILIDADE DE TALUDES

Após o entendimento do comportamento hidrogeomecânico do talude em sua condição natural, serão executadas simulações levando em conta o efeito das mudanças climáticas, em particular de chuvas intensas, tendo em vista entender a flutuação do fator de segurança e das poropressões do maciço durante eventos de chuvas extremas. Dois cenários principais serão avaliados: (1º) considerando os efeitos de chuvas extremas derivadas da suposição de que o clima é estacionário, isto é, as estatísticas de eventos extremos não variam significativamente durante um longo período e (2º) considerando que o clima é não estacionário e os efeitos das mudanças climáticas afetam diretamente a ocorrência de eventos extremos pluviométricos.

Para o primeiro cenário será utilizado os dados de variáveis climáticas como por exemplo (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar) com base na climatologia histórica (1994-2024). Esses dados podem ser obtidos por meio de sensores de superfície disponibilizados pela ANA, INPE e INMET ou via satélite por meio de produtos orbitais disponibilizados gratuitamente como o CHIRPS, GPM, TRMM, GSMaP, MERGE e ERA5. Para a obtenção de dados de precipitação, temperatura e umidade do ar para cenários futuros (2024-2100), serão utilizados um conjunto de simulações oriundas do ProjETA a partir do Modelo Regional Eta do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em combinação com alguns modelos globais, usados como modelos forçantes do projeto CMIP5. Tais modelos utilizam os cenários climáticos do CMIP5 com RCP de 4.5 e 8.5 a uma resolução espacial de 20 km.

Por último, serão executadas análises numéricas adicionais para avaliar a resiliência dos taludes perante os efeitos de chuvas extremas futuras, considerando a implantação de sistemas de contenção de baixo custo, sistemas de drenagem dimensionados para um novo tempo de retorno (com base na climatologia futura) e/ou revestimento vegetal.

7. CONCLUSÕES

A conclusão apresentada no artigo fornece uma visão abrangente das pesquisas em andamento dentro do projeto "Metodologia para Avaliação de Risco de Escorregamentos que Causam Danos à Ferrovia". As tecnologias e métodos de análise discutidos fornecem uma abordagem completa para avaliar e monitorar a suscetibilidade da ferrovia a escorregamentos. Desde a inspeção inicial com drones até o monitoramento em tempo real com sensores de baixo custo conectados à IoT, todas as etapas são abordadas de forma integrada.

A utilização de diversas ferramentas, como InSAR e radares interferométricos terrestres, aliada à investigação geotécnica de campo e ensaios laboratoriais, permite uma compreensão mais profunda do comportamento dos taludes. A calibração de modelos constitutivos e o uso de modelos computacionais para prever o comportamento futuro são destacados como ferramentas essenciais para a gestão de riscos.

Além disso, ao considerar o clima passado e as previsões das mudanças climáticas, torna-se possível simular as condições de estabilidade em um futuro climático mais severo. Esses cenários podem ser valiosos para a tomada de decisões e a gestão de

ativos, permitindo que sejam desenvolvidas estratégias resilientes para lidar com os efeitos das mudanças climáticas e eventos extremos.

Em suma, as pesquisas apresentadas neste trabalho não apenas contribuem para uma melhor compreensão dos riscos associados aos escorregamentos ferroviários, mas também oferecem ferramentas e conhecimentos essenciais para a gestão eficaz desses riscos em um contexto de mudanças climáticas. Essas abordagens integradas e multidisciplinares são fundamentais para garantir a segurança e a sustentabilidade das infraestruturas ferroviárias no futuro.

8. REFERÊNCIAS

- ALBINO, U. R.; PORTELINHA, F. H. M.; FUTAI, M. M. Numerical simulation of a geotextile soil wall considering soil-atmosphere interaction. *Geosynthetics International*, v. 27, n. 4, p. 394-413, 2020.
- BORDONI, Massimiliano et al. Site-specific to local-scale shallow landslides triggering zones assessment using TRIGRS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 15, n. 5, p. 1025-1050, 2015.
- CHEN, R. P. et al. Tensile force of geogrids embedded in pile-supported reinforced embankment: A full-scale experimental study. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 44, n. 2, p. 157-169, 2016.
- FRANZOSI, Federico et al. Slope-Scale Remote Mapping of Rock Mass Fracturing by Modeling Cooling Trends Derived from Infrared Thermography. *Remote Sensing*, v. 15, n. 18, p. 4525, 2023.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. Ro; WIDGER, R. A. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal*, v. 15, n. 3, p. 313-321, 1978.
- FROUDE, Melanie J.; PETLEY, David N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 18, n. 8, p. 2161-2181, 2018.
- GAMPERL, Moritz; SINGER, John; THURO, Kurosch. Internet of things geosensor network for cost-effective landslide early warning systems. *Sensors*, v. 21, n. 8, p. 2609, 2021.
- GEO-SLOPE. Seepage modeling with SEEP/W 2018. Calgary, Canada: GEO- SLOPE International Ltd. , 2018a.
- GEO-SLOPE. Stability modeling with SLOPE/W 2018. Calgary, Canada: GEO- SLOPE International Ltd. , 2018b.
- GIORDAN, Daniele et al. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 79, p. 3437-3481, 2020.
- DR, GREENWAY. Vegetation and slope stability. *Slope stability*, p. 187-230, 1987.
- HAUSWIRTH, D. et al. Use of fiber-optic sensors for simple assessment of ground surface displacements during tunneling. *Géotechnique*, v. 64, n. 10, p. 837-842, 2014.
- ITEN, Michael; PUZRIN, Alexander M.; SCHMID, Andreas. Landslide monitoring using a road-embedded optical fiber sensor. In: *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems 2008*. SPIE, 2008. p. 328-336.
- KLAR, Assaf; LINKER, Raphael. Feasibility study of automated detection of tunnel excavation by Brillouin optical time domain reflectometry. *Tunneling and Underground Space Technology*, v. 25, n. 5, p. 575-586, 2010.

- KOMARIZADEHASL, Seyedmilad et al. A novel wireless low-cost inclinometer made from combining the measurements of multiple MEMS gyroscopes and accelerometers. *Sensors*, v. 22, n. 15, p. 5605, 2022.
- MARINO, Pasquale et al. Prototype of an IoT-based low-cost sensor network for the hydrological monitoring of landslide-prone areas. *Sensors*, v. 23, n. 4, p. 2299, 2023.
- MELO, Carla Moreira; KOBİYAMA, Masato. Aplicação do modelo SHALSTAB no estudo de escorregamentos no Brasil: revisão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Vol. 19, n. 4, p. 721-738, 2018.
- MICHEL, Gean Paulo; KOBİYAMA, Masato; GOERL, Roberto Fabris. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *Journal of soils and sediments*, v. 14, p. 1266-1277, 2014.
- MOSER, Florian et al. Long-term monitoring of reinforced earth structures using distributed fiber optic sensing. *Journal of civil structural health monitoring*, v. 6, p. 321-327, 2016.
- NERY, Tullius Dias; VIEIRA, Bianca Carvalho. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 74, p. 369-378, 2015.
- PALIN, Erika J. et al. Implications of climate change for railway infrastructure. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 12, n. 5, p. e 728, 2021.
- PIROTON, Valentine et al. Monitoring the recent activity of landslides in the Mailuu-Suu Valley (Kyrgyzstan) using radar and optical remote sensing techniques. *Geosciences*, v. 10, n. 5, p. 164, 2020.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, v. 1, p. 318-333, 1931.
- RAHARDJO, Harianto; SATYANAGA, Alfrendo; LEONG, Eng Choon. Unsaturated soil mechanics for slope stabilization. *Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA*, v. 43, n. 1, p. 48-58, 2012.
- TESSARI, Giulia; FLORIS, Mario; PASQUALI, P. Phase and amplitude analyses of SAR data for landslide detection and monitoring in non-urban areas located in the North-Eastern Italian pre-Alps. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, p. 1-11, 2017.
- THADURI, Adithya; GARMABAKI, Amir; KUMAR, Uday. Impact of climate change on railway operation and maintenance in Sweden: A State-of-the-art review. *Maintenance, reliability, and condition monitoring (MRCM)*, v. 1, n. 2, p. 52-70, 2021.
- URGILEZ VINUEZA, Alexandra et al. A new method to detect changes in displacement rates of slow-moving landslides using InSAR time series. *Landslides*, v. 19, n. 9, p. 2233-2247, 2022.
- VANAPALLI, S. K. et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian geotechnical journal*, v. 33, n. 3, p. 379-392, 1996.
- VERGOTE, Thomas A. A Wireless Solar-Powered Pore Pressure Sensor For Monitoring Of Hydraulically Dredged Sediments Used In Land Reclamations. In: 7th International Symposium on Sediment Management. Lille, France. 2021.
- WANG, Xia et al. Assessing Global Landslide Casualty Risk Under Moderate Climate Change Based on Multiple GCM Projections. *International Journal of Disaster Risk Science*, v. 14, n. 5, p. 751-767, 2023.

- XING, Hao-Feng et al. Effect of driving long pre-stressed high-strength concrete pipe piles in alluvium and its mechanical behavior. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 71, p. 771-781, 2012.
- ZAMBRANA, Veroska Dueñas. Análise numérica da influência de chuvas extremas na estabilidade de taludes. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ZHANG, Dan et al. Bank slope monitoring with integrated fiber optical sensing technology in Three Gorges Reservoir Area. In: *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2: Landslide Processes*. Springer International Publishing, 2015. p. 135-138.
- ZHANG, Dan et al. Bank slope monitoring with integrated fiber optical sensing technology in Three Gorges Reservoir Area. In: *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2: Landslide Processes*. Springer International Publishing, 2015. p. 135-138.
- ZHU, Hong-Hu et al. An optical fiber monitoring system for evaluating the performance of a soil nailed slope. *Smart Structures and Systems*, v. 9, n. 5, p. 393-410, 2012.
- ZHU, Hong-Hu et al. Feasibility study of strain-based stability evaluation of locally loaded slopes: Insights from physical and numerical modeling. *Engineering Geology*, v. 208, p. 39-50, 2016.

APPLICATION OF NEW TECHNOLOGIES FOR THE EVALUATION OF RAILWAY SLOPE PERFORMANCE IN A TROPICAL REGION

Abstract

This paper presents emerging technologies for inspection, monitoring, and analysis of slopes on the Carajás Railroad (EFC), developed within the research project of the VALE Under Rail Chair. A susceptibility map for landslides is utilized, employing remote sensing data and monitoring through InSAR and LiDAR drones. Critical slopes are characterized and monitored using remote instrumentation, fiber optics, and low-cost sensors, following the methodology under development at GeoinfraUSP. The present and future behavior will be studied through numerical simulations considering the effect of vegetation, infiltration, and climate change. The methodology under development could be extended to other railways.

Keywords: Inspection, Monitoring, Slopes, Railroad, Climate Change.