

A Low-cost Sensor for Slope and Risk Areas Monitoring: Using a Digital Twin for Landslide Prevention.

Pedro Oscar Pizzetti Mariano¹, Felipe Bruno Lima da Silva², Yasmin Silva Sônego³, Carlos Eduardo Verzola Vaz⁴, Ana Regina Mizrahy Cuperschmid⁵

¹ Universidade Federal de Santa Catarina — UFSC, Florianópolis, Brasil, pedro.pm@hotmail.com;

² Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP, Campinas, Brasil, felipebrunolima@gmail.com;

³ Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Brasil, minsonego@gmail.com;

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina — UFSC, Florianópolis, Brasil, cevv00@gmail.com;

⁵ Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP, Campinas, Brasil, cuper@unicamp.br

Abstract. The objective of this research is to create a prototype of a low-cost remote sensing system for capturing data in slope areas at risk of landslides or movement to monitor and prevent disasters caused by landslides and enable remote monitoring in informal settlements. Therefore, the collected data can be used as a management tool by the government and citizens, also through a prototype of a digital twin. For the development, the following steps were considered: (1) data collection on the digital twins, software, and hardware needed to build the device; (2) sensor development through open-source electronic platforms; and (3) conducting tests to identify sensor improvements and programs. Through the sensor prototype, it became possible to collect landslide data on-site, thus revealing a direct alignment between real-world observations and the data collected by the sensor.

Keywords: Sensors, Digital twin, Parametric modeling, Landslide monitoring, Disaster mitigation.

1 Introdução

A expansão urbana brasileira, sem o planejamento e o controle urbano adequados pelas instituições públicas, causa a ocupação de áreas sujeitas a riscos geológicos, como encostas montanhosas, sítios em preservação, linhas

litorâneas e ribeirinhas, como assentamentos informais (Naves, Cardoso, Silveira, 2022).

Perez et al. (2020) apontam que, no Brasil, a ocupação urbana desordenada em áreas de risco geológico e reservas ambientais (Áreas de Preservação Permanente — APPs) causa, por conta de chuvas ou modificações do terreno, a destruição de moradias, as alterações do cenário geográfico e, em alguns casos, como mostrado em reportagens como o G1 (2023), a perda de vidas humanas. Apesar de serem eventos de baixa frequência, são de difícil previsão e podem ter consequências devastadoras para a sociedade (Chu et al., 2021).

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), a detecção imediata de deslizamentos de terra, por meio de sistemas de monitoramento in loco, pode ser crucial para salvar vidas e proteger propriedades. Isso porque as observações de campo tradicionais, apesar de serem realizadas com frequência, nem sempre conseguem identificar alterações no momento em que ocorrem.

Com o aumento da velocidade e cobertura das redes móveis de internet, é possível prevenir e minimizar os danos causados por esses eventos, por meio da transmissão de dados à população local e aos órgãos públicos, que podem monitorar as áreas de risco e direcionar recursos eficientemente (Mendrot, Anderson, Stringhini, 2019; Semione et al., 2022).

Estudos recentes mostram o potencial das tecnologias de sensoriamento remoto para a coleta de dados, monitoramento e transmissão de alertas precoces em relação ao risco de desastres por deslizamento de terra, com o objetivo de diminuir danos catastróficos (Piciullo, Calvello, Cepeda, 2018). Marciano et al. (2011) apresenta alguns desses sistemas de monitoramento de encostas, que usam instrumentos geotécnicos de ponta, como inclinômetros, extensômetros e piezômetros. Contudo, como mencionado por Highland e Bobrowsky (2008) e Marciano et al. (2011), a aquisição desse conjunto de sensores para monitoramento pode exigir um custo elevado e requer a instalação por um especialista.

Dessa forma, Marciano et al. (2011) buscaram desenvolver uma solução de baixo custo para implementar um sistema de monitoramento em uma comunidade localizada em encostas suscetíveis a deslizamentos de terra. No entanto, apesar do sensor desenvolvido ser acessível em termos de custos, esse estudo apontou gastos adicionais com caracterização geotécnica e equipamentos de perfuração do solo.

Uma maneira atual de implementar um sistema de monitoramento remoto é utilizando Gêmeo Digital (Digital Twin, DT). Um DT é uma representação digital de um objeto físico que inclui um mapeamento dinâmico bidirecional entre o objeto real (tempo real) e seu modelo digital (Riaz, McAfee, Gharbia, 2023). No entanto, um DT deve estar vinculado a um item da realidade; caso contrário, é apenas um modelo (Wright & Davidson, 2020).

A fim de prever riscos de deslizamentos, as condições que favorecem a instabilidade do solo devem ser identificadas por meio da combinação de análises geológicas e conhecimento das condições meteorológicas (Highland & Bobrowsky, 2008). Dentre os instrumentos para determinar a mecânica do movimento, e monitorar o deslizamento para alertar contra riscos iminentes de ruptura de encostas, esses autores destacam: medição eletrônica de distância (MED), inclinômetros, extensômetros, radiotelemetria, medidores de tensão e piezômetros.

Considerando essas questões, este estudo visou criar e apresentar o protótipo de um sensor de baixo custo, que permita o monitoramento de áreas suscetíveis a deslizamentos de terra em encostas, como as de assentamentos informais. O desenvolvimento desse sensor é a base para a criação de um protótipo de gêmeo digital capaz de monitorar áreas de risco de deslizamentos, criar alertas precoces e prevenir desastres.

2 Método

Para o desenvolvimento do instrumento proposto nesta pesquisa, foram planejadas quatro etapas para aperfeiçoar os conhecimentos necessários para o seu desenvolvimento teórico. As etapas foram organizadas em camadas já existentes no uso de gêmeos digitais, conforme os critérios de Dembski, F. et al. (2020) e Batty, M. (2018), sendo a coleta de dados, a transmissão e o tratamento, além da análise de dados. As primeiras etapas da pesquisa procuram preparar uma plataforma de prototipagem eletrônica (código e sensores) para, posteriormente, estabelecer como transmitir os dados e visualizá-los. O método é composto por: (1) a coleta de dados a respeito de gêmeos digitais, analisando as camadas de atuação, softwares e hardwares necessários para a construção do dispositivo; (2) o desenvolvimento do sensor por meio de plataformas eletrônicas de código aberto, como uma plataforma de prototipagem eletrônica e um hardware de placa única, como os Arduinos; (3) a coleta de dados após uma série de testes em escala reduzida e reais, para identificar as capacidades e aplicações do sensor; e (4) a transmissão dos dados para um ambiente de modelagem paramétrica, para apresentar uma visualização das modificações.

2.1 Desenvolvimento do código e montagem do sensor

A construção do sensor é composta por duas etapas: formular o código na interface do Arduino e salvar os dados pelo Processing; e montagem das partes físicas, que, unidas, geram um conjunto de dados que permite monitorar encostas. Cada uma dessas ações foi efetuada em conjunto, e construídas sequencialmente. À medida que a montagem demonstrava um bom funcionamento de um sensor isolado e respondia adequadamente à

programação, um novo elemento de medição era adicionado, continuando essa montagem até que o instrumento estivesse de acordo com os objetivos desejados.

Os códigos utilizados pelas placas de prototipagem eletrônica foram criados na interface do Arduino (programa que lê os sensores) e no Processing (para salvar automaticamente os dados coletados). A coleta dos dados foi programada de dois modos que funcionam simultaneamente: (1) a cada 5 minutos uma leitura do sensor de umidade do solo é enviada, e com ela vem os resultados dos 4 sensores de rotação (mesmo que não tenham movimentado); e (2) quando qualquer um dos sensores de rotação sofre uma movimentação é repassado os dados de informação dos demais incluindo a leitura de umidade do solo. Assim, mesmo que o solo não apresenta deslocamentos, é possível se ter uma leitura de sua umidade e, caso sofra movimentação, verificar se é por influência da umidade.

O sensor completo identifica se há movimentação de terra, tanto na superfície quanto no subsolo e monitora a umidade do solo, mesmo quando não há uma movimentação no terreno. Este dispositivo físico é projetado para que uma haste, equipada com sensores de rotação, comunique, por meio de torções, a angulação e a distância da movimentação de terra. O conjunto de sensores de rotação, juntamente com outro que mede a umidade do solo (higrômetro), permanece em funcionamento, armazenando os dados em porcentagem (0 a 100%). A figura 1 apresenta a estrutura de funcionamento do sensor, ilustrando seus mecanismos físicos, programas computacionais utilizados e o repasse de dados coletados.

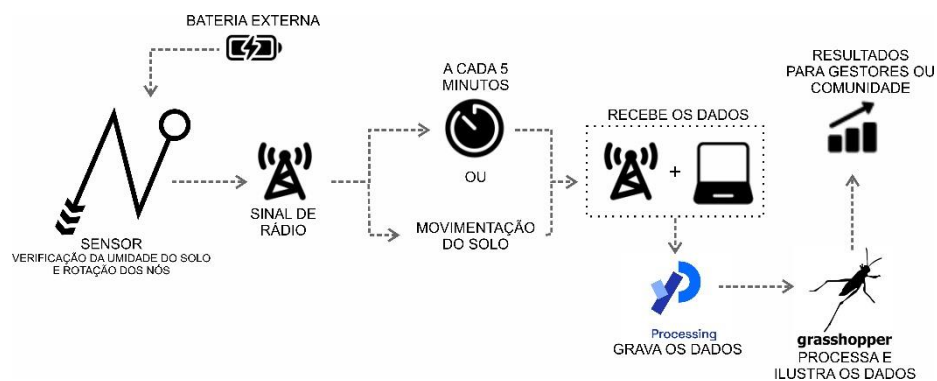


Figura 1. Estrutura do funcionamento do sensor. Os autores, 2023.

Em relação a essas partes, outro conjunto de dois sensores NRF|24 é utilizado para a transferência dos dados coletados, permitindo, por meio deles, a transmissão das informações por meio de rádio. Além dos sensores, outros dispositivos e partes físicas foram acoplados: uma bateria externa — “*Power Bank*” (para o suporte elétrico do dispositivo de 3000mAh); partes rígidas (em madeira); partes plásticas (resina termoplástica PETG), como os suportes e

conectores das outras peças (fabricadas por impressão 3D); uma estrutura sanfonada de alumínio (duto de exaustão para gás de 60 mm), para proteger o instrumento completo; um cano de PVC de 75 mm (para a instalação do sensor no solo); e “*jumpers*” (conexões macho x fêmea). A tabela 1 discrimina todos os materiais e softwares utilizados na pesquisa.

Tabela 1. Materiais e quantidades.

Sensores e peças	Quantidade
Sensor (Medidor) de Umidade do Solo (Higrômetro)	1
Sensor de rotação Módulo Encoder Rotativo KY-040	4
Arduino Mega 2560	1
Arduino Uno Rev.3	1
Módulo NRF24L01 (antena) 2.4GHz Longo Alcance	2
“ <i>Jumpers</i> ” diversos (macho x macho; macho x fêmea; e fêmea x fêmea)	-
“ <i>Power Bank</i> ” 30.000mAh	1
Cano PVC 75 mm (1,00 m)	1
Cano flexível Alumínio 60 mm (1,30 m)	1

Fonte: Os autores, 2023.

A montagem da haste, que constitui o corpo principal, é dividida em três seções, cada uma delas com dois eixos biarticulados, formando um nó, o que permite que as partes se movimentem de forma independente em qualquer direção. Em cada um desses nós, há dois sensores de rotação, permitindo a articulação em qualquer direção em um espaço de meia esfera. Essas rotações permitem que a movimentação na superfície ou abaixo dela seja identificada e medida. Essa parte da estrutura é representada pela figura 2.

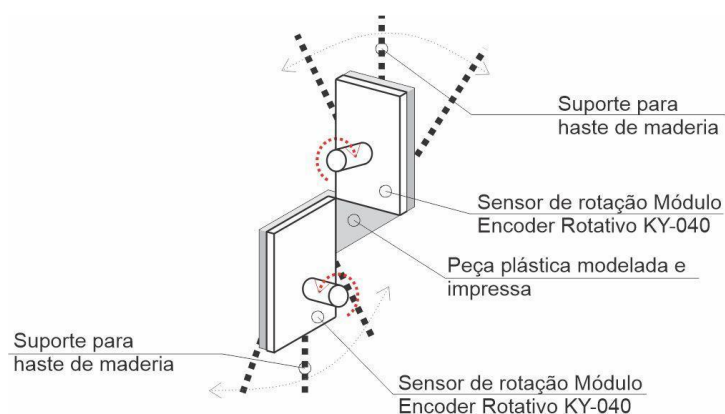


Figura 2. Representação do suporte que forma os nós da estrutura, formado por 2 Sensores de rotação, Módulo Encoder Rotativo KY-040 e uma peça plástica prototipada. Os autores, 2023.

A placa de prototipagem eletrônica, a Arduino Mega 2560, o sensor NRF|24 e a base do higrômetro conformam um conjunto que se estende por meio de jumpers até o solo (onde são coletados os dados de umidade). Toda essa estrutura possui um esqueleto de proteção plástico, com o intuito de assegurar a resistência das hastes e outras partes sensíveis. Para proteger e impedir a passagem de resíduos nos sensores e nós, uma capa de alumínio (duto de gás sanfonado) envolve toda a estrutura, e junto, as peças plásticas protegem o sistema.

Além da peça principal, outro sistema foi montado para captar os dados transmitidos pelo rádio via antena. Este sistema consiste em uma placa de Arduino Uno conectada a um segundo sensor NRF|24. A estrutura física do instrumento é composta por duas partes: (1) uma haste que coleta, processa e envia os dados; e (2) um receptor que envia as informações para serem processadas pelo computador. A figura 3 apresenta essas 2 partes, sem e com a proteção de alumínio.

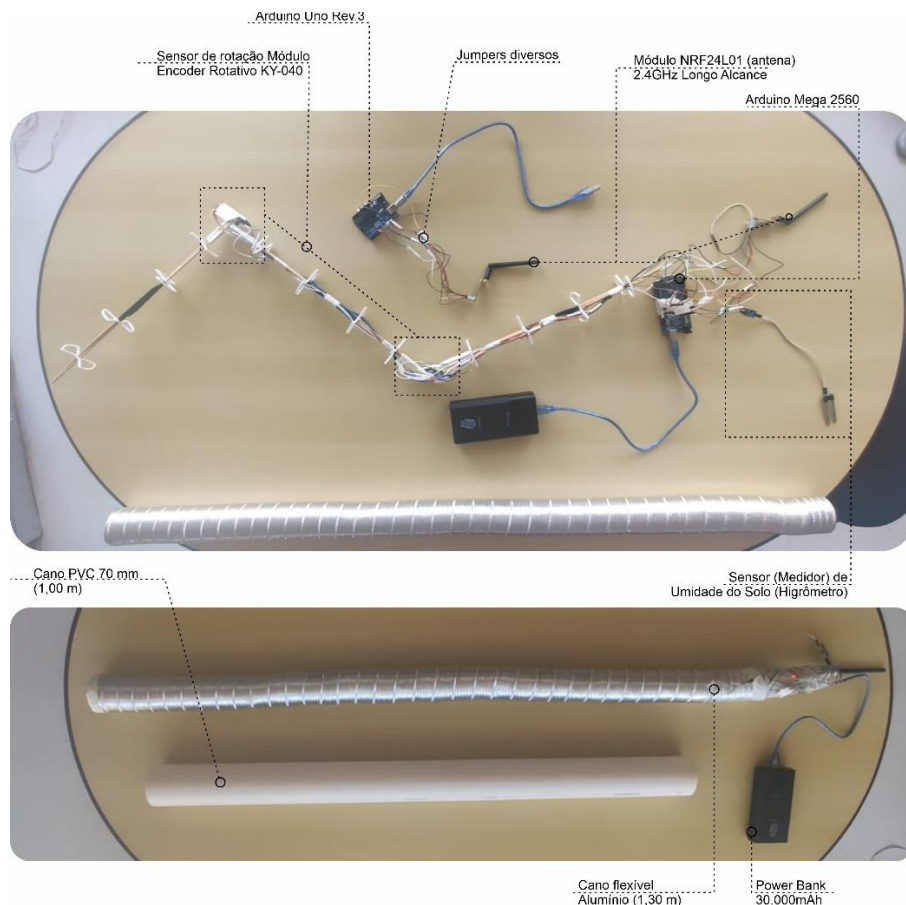


Figura 3. Estrutura com os sensores sem e com a proteção. Os autores (2023).

2.2 Desenvolvimento do ambiente para a transmissão de dados

Após a realização da etapa de coleta e transmissão de dados, iniciou-se a etapa de tratamento e visualização da informação coletada a fim de testar se as informações repassadas para o computador podiam ser modeladas e ilustradas, para facilitar a compreensão do ambiente e suas possíveis causas. Um cenário virtual, parametricamente ajustável, foi criado em um ambiente de modelagem tridimensional, utilizando como ferramenta principal o Rhinoceros 3D — versão educacional 6 - (Mcneel, 2014), o ambiente de programação visual Grasshopper (Rutten & Mcneel, 2014) e o plugin Firefly (Payne & Johnson, 2015).

No ambiente virtual modelado pelo Grasshopper no Rhinoceros 3D, um terreno similar ao espaço escolhido para os testes foi modelado. Este espaço pode sofrer alterações conforme as coordenadas dos nós e os limites de uma estrutura em haste, semelhante à desenvolvida para a acoplagem dos sensores. Essa estrutura é alimentada pelo plugin Firefly, que permite que os dados coletados pelos sensores sejam enviados para o ambiente do Grasshopper, permitindo que as movimentações, que ocorrem em tempo real ou estejam armazenadas, sejam tratadas no ambiente virtual. Desta forma, apresenta, em um ambiente virtual, o que está ocorrendo no mundo real.

2.3 Teste do sensor

O sensor desenvolvido foi testado em dois momentos distintos, com geografias semelhantes, mas topografias distintas. Os testes foram conduzidos controladamente, visando, propositalmente, deslocar o material sólido do terreno e umedecê-lo. Essas avaliações tiveram como objetivo identificar falhas e possíveis melhorias no protótipo do sensor, bem como testar seus mecanismos básicos, tais como: (1) os nós articulados; (2) a resistência das peças usadas; (3) a transmissão dos dados coletados; (4) a qualidade das peças e sensores; e (5) o tratamento dos dados no ambiente digital de modelagem.

O local de realização dos testes foram as Dunas da Joaquina, localizada em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. A escolha do local foi fundamentada em dois fatores: a materialidade do solo (areia) e a disponibilidade de cenários para testes. A primeira característica, o solo arenoso, foi criada devido à facilidade de instalação do sensor - que requer cavar e enterrar o equipamento - e ao fato de ser necessário um ambiente controlado para testes - como forçar o desmoronamento ou o deslocamento do solo. Além disso, o local foi escolhido por apresentar uma variedade de cenários, avaliados de perto para os dois testes, sendo o primeiro um talude com inclinação superior a 45° e o segundo um barranco, com uma das laterais próximas a 90° de inclinação.

Os dois testes foram realizados no final de julho de 2023 e usaram o mesmo sensor. Sua aplicação foi semelhante, alterando basicamente o relevo onde era enterrado e aconteceu em 8 etapas, sendo: (1) a perfuração da terra com o auxílio de um cano de PVC rígido e a instalação do sensor; (2) a ligação do sensor e do rádio para a captação dos dados; (3) teste — movimentação leve do sensor — para a verificação da transmissão das informações; (4) deslocamento inicial da terra; (5) a umidificação do solo próxima ao sensor de umidade do solo (aproximadamente 300ml); (6) novo deslocamento de terra; (7) maior umidificação do solo (aproximadamente 300ml); e (8) o desligamento e recolhimento do sensor. A figura 4 apresenta algumas etapas da aplicação dos testes.



Figura 4. Sequência de ações realizadas para o segundo teste. Os autores, 2023

3 Resultados

Os resultados coletados e analisados, tanto do protótipo quanto do ambiente digital de visualização, revelaram potencialidades que podem ser expandidas e aprimoradas futuramente. O dispositivo forneceu informações que permitiram modificar e ilustrar o ambiente digital modelado, confirmando o sucesso inicial, uma vez que permitiu a coleta de dados sobre a movimentação do solo, a transmissão via rádio para o computador e, logo após, o tratamento desses dados permitiu a alteração do cenário paramétrico. O protótipo do sensor desenvolvido também demonstrou potencial para coletar e apresentar dados por meio de um instrumento de menor valor agregado.

Os dois principais resultados do protótipo são: (1) as informações salvas pelo Processing em um bloco de notas; e (2) as imagens da leitura dessas informações pelo algoritmo criado. O primeiro registro foi feito em um bloco de notas, contendo as informações enviadas pelos sensores utilizados no protótipo, tais como: a data de coleta e o envio das informações; o giro de cada um dos sensores de rotação (do mais distante da superfície até o mais próximo

da antena); e a umidade do solo no momento da coleta das informações. O segundo resultado foi uma visualização tridimensional dos dados enviados, onde é possível notar a alteração da topografia do relevo, por meio da leitura dos dados enviados por rádio. Nesta ilustração – apresentada pela figura 5 - foi possível identificar por cores o espaço onde ocorreu a principal mudança do nível do solo. Outro fator que complementa a percepção visual foi o fatiamento do terreno, que apresenta curvas de nível a cada 0,20 m de altura.

Um exemplo de um dos testes pode ser visualizado na Figura 5, que demonstra o primeiro teste realizado em um relevo de cerca de 45°. Nessa figura, é possível visualizar o sensor durante os dois principais deslocamentos de terra realizados, bem como o comportamento do modelo no computador conforme os dados enviados.

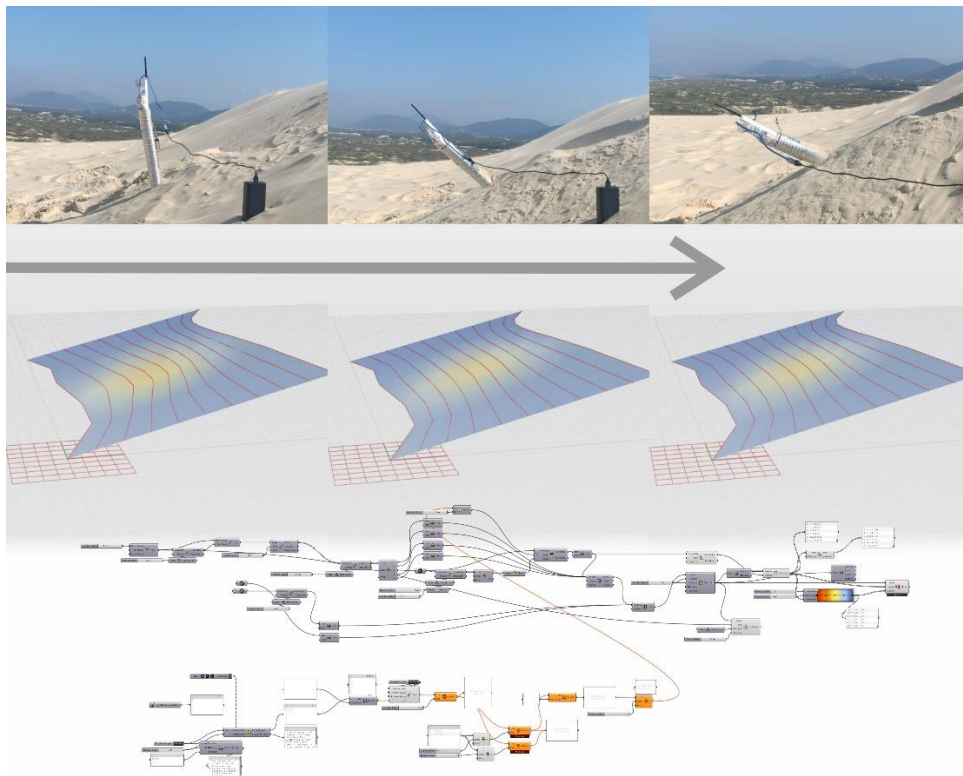


Figura 5. Da esquerda para a direita, na parte superior da figura, é apresentado o sensor em campo no primeiro teste, e abaixo, a resposta interpretada pelos dados recebidos pelo algoritmo desenvolvido. Os autores, 2023.

4 Conclusões

A principal contribuição deste trabalho foi apresentar o desenvolvimento de um sensor para monitorar o deslizamento de encostas, com os seguintes diferenciais em relação às pesquisas anteriores: (1) foi elaborado a partir de materiais de baixo custo, de modo a possibilitar sua aplicação em assentamentos informais, sem impor custos adicionais à comunidade ou à administração pública; (2) permite a detecção de deslizamentos baseada na solução de rotação de eixos, ou seja, sem a necessidade de acelerômetro e inclinômetro embarcados; (3) pode ser instalado de forma rápida e simples por até 2 pessoas, sem a necessidade de máquinas de perfuração; (4) foi criado como parte de um sistema integrado a um gêmeo digital, que reproduz virtualmente o comportamento mecânico do sensor e a movimentação do terreno em tempo real, atuando como uma ferramenta de monitoramento remoto eficiente e atual, que transmite alertas precoces de deslizamento e previne desastres.

Os planos para a continuidade do trabalho são: (1) a transmissão das informações por meio de um conjunto de antenas; (2) o uso de ferramentas imersivas para a visualização dos dados; (3) o alerta de risco para gestores e moradores; (4) o aprimoramento dos resultados das strings coletadas; (5) a visualização de mudanças de umidade no terreno na plataforma tridimensional; e (6) o sistema de DT elaborado.

Uma rede de antenas posicionadas de forma estratégica poderia auxiliar na criação de uma rede de transferências de dados, permitindo que um conjunto de sensores enviasse informações ao mesmo tempo e a uma maior distância. Dessa forma, seria possível monitorar remotamente áreas mais distantes e de difícil acesso. Esse tipo de informação seria possível ser analisado por uma Realidade Aumentada ou Virtual (RA e RV), o que facilitaria a interpretação das informações por gestores e população para tomar decisões e na apresentação à comunidade.

Para futuros trabalhos, o plugin Firefly pode ser usado para que os dados gráficos apresentados no Grasshopper sejam retornados para uma placa de prototipagem eletrônica. A transmissão da informação, que poderia ser feita de um ambiente virtual de modelagem para um ambiente físico, poderia gerar alertas (luminosos ou sonoros) que poderiam ser instalados em áreas de risco ou monitorados por gestores públicos. Isso implica em um aprimoramento do código desenvolvido dentro do Arduino, bem como no aprimoramento dos resultados coletados, visando simplificar o tratamento dos dados no ambiente de modelagem paramétrica. Além disso, o ambiente digital preparado para a leitura dos dados também deve sofrer alterações na organização dos dados enviados, podendo também apresentar alterações visuais na umidade do solo, seja por meio de cores ou texto.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao CNPQ pelo apoio à pesquisa a partir do financiamento mediante projeto universal, a FAPESC a partir do financiamento por meio do Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação aos Grupos de Pesquisa da Universidade Federal de Santa Catarina, a CAPES pela bolsa disponibilizada aos integrantes e ao Grupo de Modelagem Avançada - GMA UFSC, pelo espaço e ferramentas disponibilizadas.

Referências

- Batty, M. (2018). Digital Twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45, 817-820.
- Chu, M. et al. (2021). SitkaNet: A low-cost, distributed sensor network for landslide monitoring and study. *HardwareX*, 9(e00191).
- Dembski, F. et al. (2020). Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg. *Sustainability*, 12(2307).
- G1 (Rio de Janeiro). (2023). Em 24 horas, 6 pessoas morrem em decorrência das chuvas no RJ. Recuperado de: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2023/02/08/morte-chuva-catete.ghml>. Acesso em: 8 fev. 2023.
- Highland, L. M. & Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular, 1325, 129p.
- Marciano, J. S., Jr. et al. (2011). Real-World Deployment of a Locally-Developed Tilt and Moisture Sensor for Landslide Monitoring in the Philippines. In *Proceedings of the 2011 IEEE*.
- Mcneel, R. (2014). Associates. Rhinoceros 3D modelling Software. v. 5.
- Mendrot F., Anderson S., & Stringhini, D. (2019). Redes de sensores sem fio para monitoramento e detecção de deslizamentos de terra: uma revisão sistemática. In *IADIS IBERO-AMERICANAS*, 309-313.
- Naves, N. R. C., Cardoso, M. A. C., & Silveira, S. S. (2022). A Ocupação das Cidades e a Proteção ao Meio Ambiente. In *Congresso Brasileiro de Processo Coletivo e Cidadania*, 490-504.
- Payne, A., & Johnson, J. K. (2015). Firefly. 2015. Go from Code to Nodes — and back.
- Perez, L. P. et al. (2020). Mudanças climáticas e desastres: análise das desigualdades regionais no Brasil. *Sustainability In Debate*, 11, 278-296.
- Piciullo, L., Calvellido, M., & Cepeda, J., (2018). Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides. *Earth Science Reviews*, 179, 228–247.
- Riaz, K., McAfee, M. & Gharbia, S. (2023). Management of Climate Resilience: Exploring the Potential of Digital Twin Technology, 3D City Modelling, and Early Warning Systems. *Sensors*, 23(5).
- Rutten, D., & Mcneel, R. (2014). Grasshopper 3D, EULA. www.grasshopper3d.com.

Semione, A. et al. (2022). Desenvolvimento de módulos para monitoramento de encostas com o uso de sensores wireless. In Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 381-837.

Wright, L., & Davidson, S. (2020). How to Tell the Difference between a Model and a Digital Twin. Adv. Model. Simul. Eng. Sci, 7(13).