



## A confiabilidade da utilização de dispositivos IoT para monitoramento da estabilidade de taludes

Kaiene Domingues Paz

Engenheira Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, kaiene.dpaz@gmail.com

Flávio Leal Maranhão

Prof. Dr., Universidade de São Paulo, São Paulo, flavio.maranhao@gmail.com

Núncio Perrella

Professor Me., Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo, nuncio@geovista.com.br

Gisely Maria da Silva

Geóloga Me., Universidade Federal de Pernambuco, São Paulo, gisely.maria@ufpe.br

Glenda Lira Santos

Geóloga Dra., Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia, São Paulo, glendaliraa@gmail.com

**RESUMO:** Deslizamentos de terra consistem em eventos geológicos de origem natural ou decorrentes de ação antrópica, que transformam a paisagem terrestre. A ocorrência em centros urbanos oferece grande risco à população local, causando centenas de mortes anualmente. De acordo com levantamento realizado pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) em 2023, 4.218 pessoas morreram em deslizamentos no Brasil nos últimos 35 anos. Dentre as abordagens de prevenção de risco, o emprego de uma rede de sensores IoT para monitoramento contínuo se destaca por ser uma solução que minimiza o erro sistemático e possibilita a tomada de decisão rápida e eficaz. O presente trabalho tem como objetivo validar um sistema de aquisição de dados para monitoramento da estabilidade de taludes, utilizando sensores que fornecem em tempo real dados de parâmetros preliminares de movimentação de terra, umidade relativa do ar, temperatura, pressão atmosférica, precipitação e resistividade elétrica do solo. A rede de sensores consiste em duas partes, que são alimentadas por bateria e painel solar: (i) o corpo, onde são conectados os dispositivos a uma central por meio de uma rede de comunicação RS-485, e os sensores de umidade relativa do ar, termômetro, barômetro e pluviômetro; (ii) o conjunto de sensores móveis, consistindo em três hastes metálicas, independentes, composta de três acelerômetros ADXL335, dos quais medem aceleração nas 3 direções (x, y e z), e o sistema de medição da resistividade elétrica do solo. As informações recebidas são dispostas em sistema capaz de emitir alertas para as entidades interessadas. Com isso, espera-se validar o conjunto de sensores proposto, entender suas limitações e possíveis erros para assim, criar um sistema de monitoramento da estabilidade de taludes eficiente buscando mitigar os riscos em locais com grandes chances de deslizamento de terra, como áreas urbanas de risco e rodovias.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monitoramento, Sensores IoT, Deslizamentos.

**ABSTRACT:** Landslides are geological events of natural origin or resulting from anthropogenic actions that transform the terrestrial landscape. Their occurrence in urban centers poses a significant risk to the local population causing hundreds of deaths annually. According to a survey conducted by IPT (Institute for Technological Research) in 2023, over 4.218 people died in landslides in Brazil in the past 35 years. Within the risk assessment approaches, the use of IoT sensors for continuous monitoring stands out as a solution that minimizes systematic errors and enables rapid and effective decision-making. This study aims to validate a



data acquisition system for monitoring slope stability, using sensors that provide real-time data on preliminary parameters such as ground movement, relative humidity, temperature, atmospheric pressure, precipitation, and soil electrical resistivity. The studied sensors consists of two parts, both powered by batteries and a solar panels: (i) the main unit, where the devices are connected to a central hub via an RS-485 communication network, along with the relative humidity sensor, thermometer, barometer, and rain gauge; and (ii) the mobile sensor set, composed of three independent metallic rods equipped with three ADXL335 accelerometers each, which measure acceleration in the three directions (x, y, and z), and a system for measuring soil electrical resistivity. The collected information is displayed in a system capable of issuing alerts to the relevant authorities. Thus, this study seeks to validate the proposed sensor set, understand its limitations and possible errors, and thereby create an efficient slope stability monitoring system aimed at mitigating risks in areas highly susceptible to landslides, such as urban risk zones and highways.

**KEYWORDS:** Monitoring, IoT sensors, Landslides.

## 1 INTRODUÇÃO

Deslizamentos de terra ou movimentos de massa se caracterizam como um dos principais riscos geológicos enfrentados pela população mundial, e geralmente estão associados às variações climáticas, dinâmicas fluviais, atividades sísmicas e intervenções humanas (Chen & Xu, 2024). Estudos demonstram que desde 1990, desastres naturais causaram mais de 1,6 milhões de fatalidades globais, e os custos associados estimam em torno de 260-310 bilhões de dólares por ano (UNDRR, 2015). No Brasil, entre os anos de 1991 e 2019, foram contabilizadas 3052 fatalidades associadas aos riscos de deslizamentos (1072 ocorrências), inundações (5309 ocorrências) e enxurradas (8887 ocorrências; BRASIL 2022). Dentro deste contexto, iniciativas globais e nacionais estão sendo desenvolvidas para que ocorra a redução e prevenção de desastres naturais, além de implementação de políticas de conscientização, normas e ações. O Marco de Sendai (UNISDR, 2015), principal documento internacional adotado com esta premissa, pretende englobar esferas sócio-econômicas, ambientais, tecnológicas e políticas para obtenção de resultados em 15 anos. No âmbito nacional, foi instituído em 2003, o Programa de Urbanização, Regularização e Integração de Assentamentos Precários, pelo Ministério das Cidades (MCID), um conjunto de ações para a redução de riscos nas áreas urbanas, incluindo aporte de recursos para a elaboração dos Planos Municipais de Redução de Riscos (PMRRs) (Mendonça et al., 2023 e citações nele contidas).

Como medida de prevenção de riscos, tecnologias digitais vêm sendo amplamente utilizadas como ferramentas de predição, mapeamento e monitoramento de riscos de movimento de massas (Araújo et al., 2022), dentre elas: inteligência artificial, sensoriamento remoto, métodos geofísicos, análise de *big data* e Internet das Coisas ( *Internet of Things - IoT* ) (Chen & Xu, 2024). Considerando os diferentes métodos de abordagem, o modelo IoT busca incorporar as diferentes técnicas supracitadas de forma eficiente, por ser uma solução que minimiza o erro sistemático, possibilitando a tomada de decisão rápida e eficaz, além de possibilitar a inserção de um Sistemas de Alerta Precoce - SAP (*EWS - Early Warning System*). Usualmente, o IoT associa um objeto com uma inteligência local para captação dos dados (quando for o caso, e.g. inclinômetro, extensômetro etc.), e sua comunicação, de forma integrativa para gerar conhecimento do local e dados visuais para interpretação dos fenômenos (Thirugnanam et al., 2022).

Dentre os trabalhos desenvolvidos em torno do SAP para estabilidade de taludes, diferentes montagens de sensores foram realizadas, incluindo principalmente inclinômetros, extensômetros, acelerômetros, giroscópio, sensor de umidade, associações dos dados com pluviômetros etc (Brito, 2013; Askarinejad & Springman, 2017; Wang et al., 2018; Otero, 2020). Apesar da quantidade e qualidade valiosa de informações, não se há um consenso entre um conjunto sistemático de sensores, e suas validações de dados de forma a serem replicados.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo validar um sistema de aquisição de dados de uma rede de sensores IoT para monitoramento da estabilidade de taludes, utilizando um conjunto de sensores que fornecem em tempo real dados de parâmetros preliminares de movimentação de terra, umidade relativa do ar, temperatura, pressão atmosférica, precipitação e resistividade elétrica do solo.

## 2 SISTEMA DE SENsoRES

O sistema de sensores em estudo foi concebido dentro de um sistema IoT para resultar em um possível sistema de alerta precoce para deslizamentos de encostas. Foram escolhidos diferentes sensores para compor o sistema de forma que integrados, seja possível a combinação de informações para parametrizar níveis de risco e alertas associados. Estes sensores são: sensores de umidade relativa do ar, termômetro, barômetro, pluviômetro, sensor de resistividade elétrica do solo e acelerômetros.

### 2.1 Estruturação (Hardware)

A rede de sensores pode ser subdividida em duas partes, ambas alimentadas por bateria e painel solar. A primeira parte, chamada de “corpo”, consiste num painel central conectando uma rede de comunicação RS-485 a todos os sensores. O pluviômetro e o sensores de umidade relativa do ar, temperatura e barômetro estão conectados ao corpo do sensor como demonstrado na Figura 1.

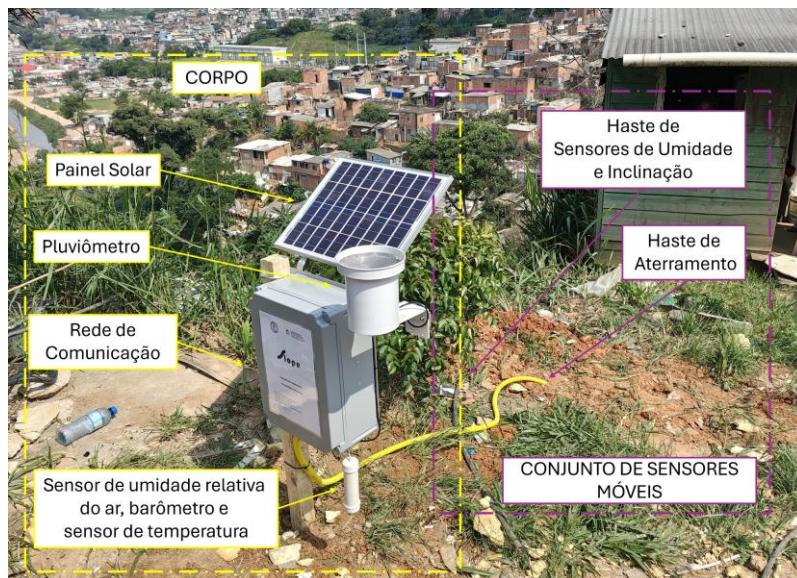


Figura 1. Estruturação do corpo do conjunto de sensores de sistema IoT em estudo.

A segunda parte, configura o conjunto de sensores móveis, consistindo em três hastes metálicas, de 0,60 metros de extensão, que são independentes, com conectores móveis. Cada haste contém três acelerômetros ADXL335, dos quais medem aceleração nas 3 direções (x, y e z), junto ao sistema de medição da resistividade elétrica do solo. Este sistema de sensores é montado em uma placa que então é resinada, para proteção de intempéries do meio, formando uma cápsula que é envolvida pelo material metálico (Figura 2). Juntamente com este sensor, uma haste de aterramento de cobre para validação do valor de resistividade elétrica do solo, de tamanho similar também será acoplada ao sistema.

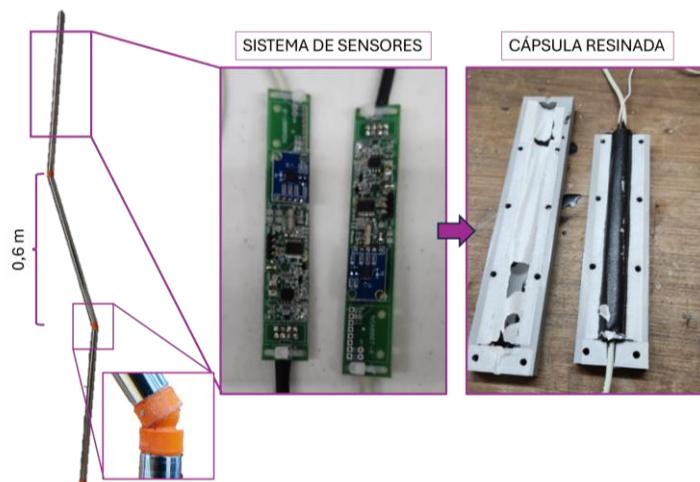


Figura 2. Conjunto de sensores móveis montado em hastes metálicas.

## 2.2 Sistema de Integração (Software)

Uma vez coletados, os dados são transmitidos via rádio (LoRa) para um banco de dados em nuvem hospedado na plataforma *Oracle Cloud*, com frequência de aquisição de três minutos. Esse intervalo pode ser reduzido para um minuto ou ajustado conforme necessário, sendo possível, ainda, empregar outras formas de comunicação, como *Bluetooth* ou rede 4G, possibilitando a obtenção de dados em tempo quase real. Em seguida, os dados são processados e apresentados por meio de gráficos em um sistema desenvolvido especificamente para esta pesquisa.

## 2.3 Instalação

A instalação do sistema de sensores é caracterizada por um processo com duração aproximada de uma hora por sensor. As etapas envolvidas são:

- Realização de dois furos com o uso de trado concha, semelhante ao empregado nos ensaios de sondagem, até a profundidade especificada para a instalação do sensor. Os furos devem ser feitos com uma distância de 0,60 metros entre seus centros;
- Inserção das hastes dos sensores de resistividade elétrica e dos acelerômetros em um dos furos, e da barra de aterramento no outro, seguida do preenchimento com o solo previamente retirado e com areia média;
- Proteção dos cabos que conectam os sensores enterrados à caixa de interface, seguida do seu posterior enterramento;
- Instalação da caixa e dos sensores externos, com o posicionamento do painel solar de modo a maximizar a incidência de luz solar ao longo do dia;
- Ligações e ajustes finais.

## 3 METODOLOGIA

O esquema a seguir representa a estrutura utilizada nos ensaios realizados, os quais foram divididos em: (i) ensaios de consistência dos dados; e (ii) ensaios de sensibilidade do acelerômetro (Figura 3). Os ensaios de consistência tiveram como objetivo verificar a estabilidade dos valores medidos pelos acelerômetros ao longo do tempo, quando os sensores permaneciam em repouso. Já os ensaios de sensibilidade buscaram avaliar a precisão das medições realizadas pelos acelerômetros em relação aos ângulos previamente definidos.



2025

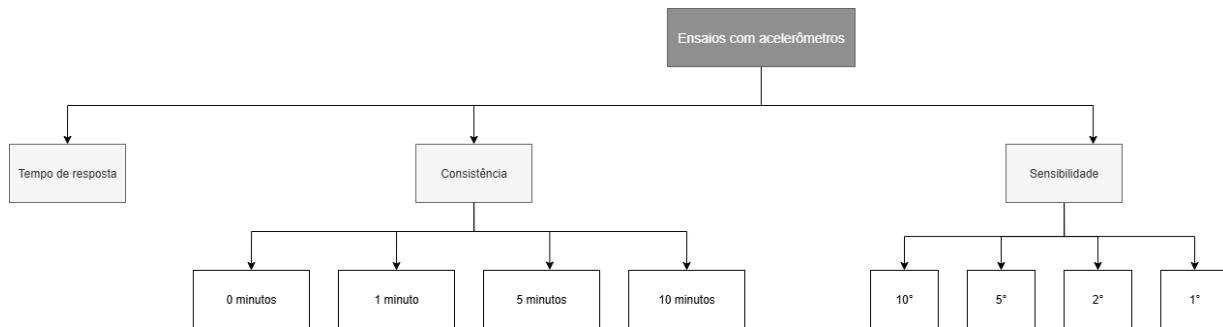


Figura 3. Esquema metodológico dos ensaios realizados.

Com o objetivo de verificar a confiabilidade dos dados fornecidos pelos acelerômetros, foi desenvolvida uma estrutura que permitisse a variação dos ângulos em valores previamente conhecidos, os quais foram posteriormente comparados aos dados registrados pelo sistema. A estrutura consiste em um círculo trigonométrico, onde uma haste móvel é fixada em seu centro, podendo ser rotacionada até as marcações correspondentes aos ângulos desejados (Figura 4). Um acelerômetro, preso a uma barra menor de 20 cm de comprimento, foi acoplado a essa haste, de modo a acompanhar seu movimento rotacional em uma direção. Para cada ângulo posicionado, aguardava-se um intervalo de tempo predeterminado antes de registrar novamente o valor medido.



Figura 4. Estrutura utilizada para os ensaios com os acelerômetros.

Para os ensaios de sensibilidade foi criada uma plataforma automatizada de posicionamento angular que possui motores de passo acoplados a um arranjo mecânico de guias (Figura 5). Um microcontrolador ESP32 atua como a unidade central de controle do dispositivo, fazendo o conjunto rotacionar de acordo com o ângulo desejado, em torno de dois eixos: x e y. Sua precisão testada é de 0,10°. A medição da inclinação do talude e do deslocamento do solo é realizada por meio de sensores acelerômetros GY-61, fixados em pontos específicos de uma haste com juntas flexíveis. Quando o talude sofre deslocamento, os sensores captam as acelerações associadas a esses movimentos. O sistema registra as variações de aceleração nos três eixos, que são associadas à variação da inclinação. A inclinação é determinada pela decomposição da aceleração da gravidade detectada pelos sensores nos três eixos conforme (1), sendo  $a_z$ ,  $a_x$  e  $a_y$  as acelerações correspondentes aos eixos x, y e z.

$$\alpha = \arccos \left( \frac{a_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (1)$$

Quando o sensor é inclinado, a aceleração gravitacional se distribui de maneira diferente entre os eixos. Os valores obtidos são registrados em função da força g. Assim, a inclinação é uma medida estática, onde o

componente experimenta acelerações variando entre  $-1g$  e  $+1g$ , com o módulo da combinação da aceleração nos três eixos igual a  $1g$ . O acelerômetro utilizado (ADXL335) suporta valores no intervalo de  $\pm 3g$  [1].

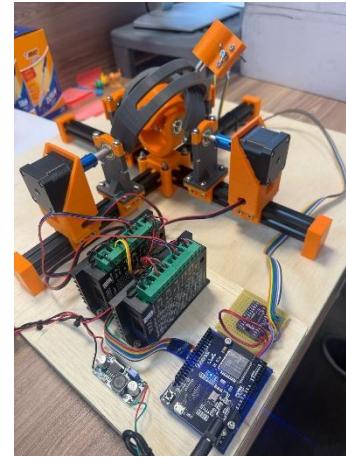
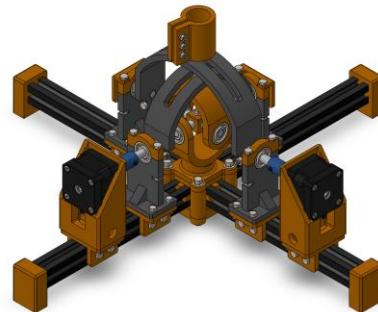


Figura 5. Plataforma automatizada criada para os testes de sensibilidade dos acelerômetros.

#### 4 RESULTADOS

A primeira análise realizada referiu-se ao tempo de resposta dos sensores, com uma amostra de 515 medidas. Foi avaliada a variação entre a medida registrada imediatamente após o posicionamento da haste e aquela obtida três minutos depois. Como resultado, observou-se um erro médio de 0,41%, equivalente a  $0,16^\circ$ .

Com o objetivo de verificar a consistência dos dados obtidos, ou seja, se o valor medido pelo acelerômetro se mantém constante sempre que posicionado em uma mesma direção, foram realizados 32 ensaios para 25 ângulos distintos. Para cada conjunto de medições correspondente a um ângulo, foi calculado o desvio padrão. Os resultados indicaram um desvio padrão médio de  $0,34^\circ$ , com valor máximo observado de  $0,70^\circ$  (Figura 6). Pelo gráfico do coeficiente de variação, observa-se que os valores foram mais altos para ângulos próximos de  $90^\circ$  (correspondentes ao zero do sensor) (Figura 7). Entretanto, o valor máximo é de apenas 3%, valor muito pequeno e aceitável (abaixo de 10%).

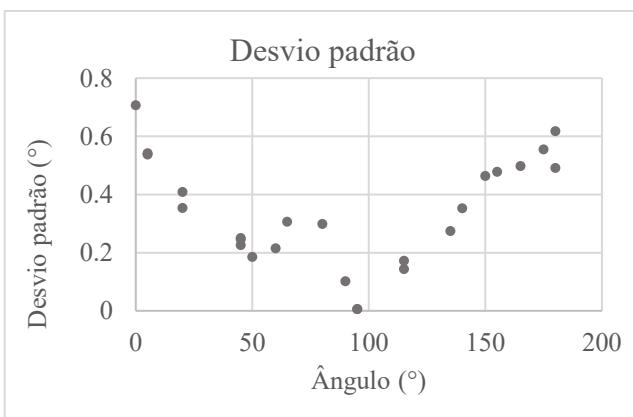


Figura 6. Desvio padrão das medidas do ensaio de confiabilidade.

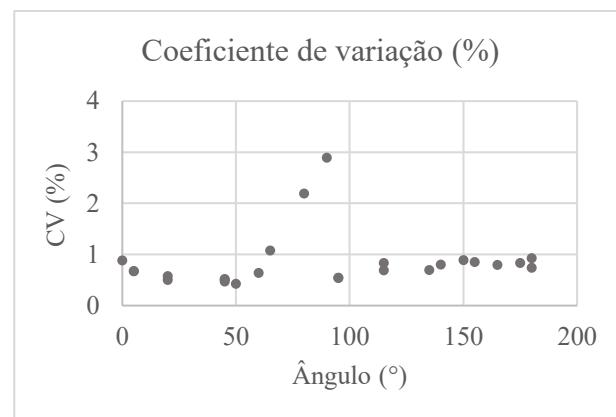


Figura 7. Coeficiente de variação das medidas do ensaio de confiabilidade.



O ensaio de sensibilidade foi realizado para ângulos de  $10^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $2^\circ$  e  $1^\circ$ , selecionados com base na sua representatividade em aplicações práticas (Figura 8). Ressalta-se que um ângulo de  $1^\circ$  corresponde a uma variação de aproximadamente 1,7 centímetro na abertura superficial, considerando um sensor instalado a 1 metro de profundidade. Os ensaios demonstraram que os ângulos de  $10^\circ$  e  $5^\circ$  obtiveram maior precisão, como era esperado. O erro médio girou em torno de 6% para o ângulo de  $10^\circ$  e de 19% para o ângulo de  $5^\circ$ , que correspondem a valores de  $0,6^\circ$  e  $0,95^\circ$  respectivamente.

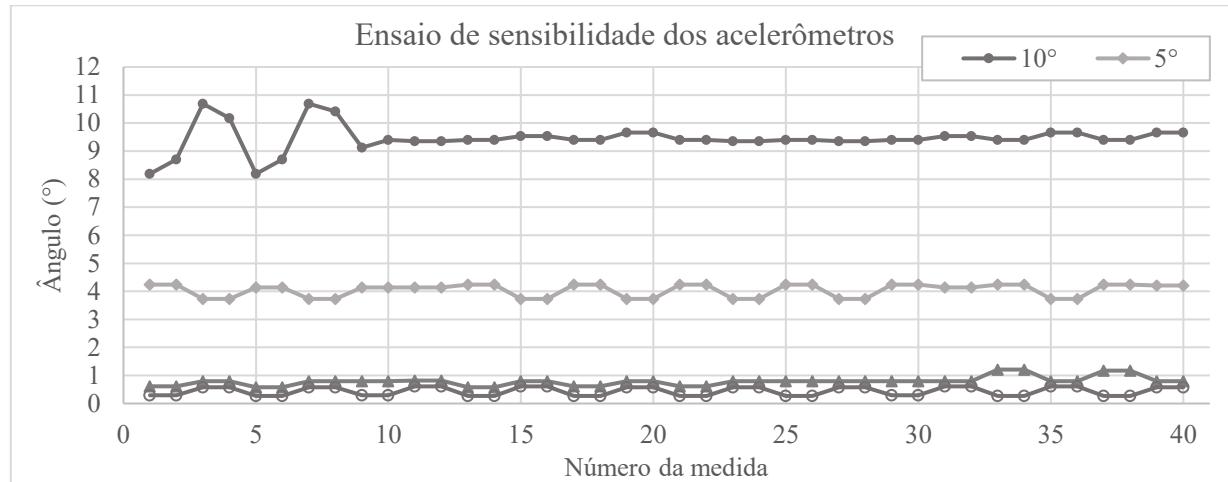


Figura 8. Resultado do ensaio de sensibilidade.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo investigar uma alternativa baseada em sensores de sistema IoT para o monitoramento de movimentos de massa, em contraposição aos métodos convencionais disponíveis no mercado, como inclinômetros, tiltômetros e extensômetros. Os sensores empregados foram divididos em duas categorias — enterrados e externos ao solo — e foram responsáveis pela medição de variáveis como temperatura, pressão atmosférica, precipitação, umidade relativa do ar, resistividade do solo e inclinação.

O estudo concentrou-se na análise dos dados provenientes dos acelerômetros, distribuídos em três hastes posicionadas a diferentes profundidades, capazes de captar variações angulares nos três eixos (x, y e z). Foram avaliados o tempo de resposta dos sensores, a consistência no recebimento das informações e a sensibilidade às variações detectadas.

O tempo de resposta do sensor demonstrou-se praticamente instantâneo, sem apresentar variações significativas entre a primeira leitura realizada imediatamente após o movimento e as subsequentes, realizadas após 3, 5 e até 10 minutos. Dessa forma, os dados recebidos em tempo real podem ser considerados confiáveis, dispensando a necessidade de correções posteriores.

No que se refere à consistência, o objetivo foi verificar se os sensores apresentaram leituras equivalentes ao serem submetidos à mesma inclinação. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com variações máximas de  $0,70^\circ$  e variação relativa inferior a 3%.

Por fim, a sensibilidade dos acelerômetros avaliada com um aparato automatizado de motores de passo (de precisão  $0,10^\circ$ ), apresentaram medições referentes aos ângulos de  $10^\circ$  e  $5^\circ$  de maior proximidade em relação aos valores esperados, com erros médios de 6% e 19%, respectivamente. Já para os ângulos de  $2^\circ$  e  $1^\circ$ , as leituras absolutas foram muito semelhantes entre si, evidenciando uma limitação na sensibilidade dos acelerômetros na detecção de variações angulares de pequena magnitude.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de novos testes com ângulos reduzidos, com o objetivo de viabilizar a aplicação de filtros e correções nas séries temporais de dados, bem como a eliminação de ruídos, a fim de aprimorar a compreensão sobre o desempenho real e a precisão dos sensores.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, G.R.M.B., Corsi, A.C., Macedo, E.S., and Futai, M.M. (2023) Application of digital technologies in landslide prediction, mapping, and monitoring. *Soils and Rocks*, 46(4), e2023005823. doi:<https://doi.org/10.28927/sr.2023.005823>.
- Askarinejad, A., and Springman, S.M. (2017) A novel technique to monitor subsurface movements of landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(5), p. 620–630. doi:<https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0338>.
- Brito, G.G. (2013) *Modelo de monitoramento de deslizamento de encostas por meio de sensor multiparamétrico*. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco / UNICAP, 145 p.
- Chen, J., and Xu, C. (2024) Geological Hazards and Risk Management. *Sustainability*, 16(8): 3286–3286. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:<https://doi.org/10.3390/su16083286>.
- Mendonça, M.B., Di Gregorio, L.T., Alfradique, C.O.S. (2023) Diagnóstico e discussão sobre Planos Municipais de Redução de Riscos no Brasil. *Ambiente & Sociedade*, 26. doi:<https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210207r1vu2023l2ao>.
- Ministério do Desenvolvimento Regional do Brasil, Secretaria de Proteção e Defesa Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, and entro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil (2022) *Atlas Digital de Desastres no Brasil*. Disponível em <<https://atlasdigital.mdr.gov.br/>> Acesso em: 10 jul. 2025.
- Otero, M.D. (2020) *Aplicação de Sensores Iniciais no Monitoramento de Taludes de Solo Sujeitos a Escorregamentos*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 103 p.
- Thirugnanam, H., Uhlemann, S., Reghunadh, R., Ramesh, M.V., and Rangan, V.P. (2022) Review of Landslide Monitoring Techniques With IoT Integration Opportunities. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, p. 5317–5338. doi:<https://doi.org/10.1109/jstars.2022.3183684>.
- UNDRR. (2015) *Global assessment report on disaster risk reduction 2015*. Disponível em:<<https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2015>>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015) *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. Disponível em:<<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- Wang, L., Nishie, S., Su, L., Yamaguchi, H., and Tao, S.N. (2018) An early warning monitoring of Earthquake-induced slope failures by monitoring inclination changes in multi-point tilt sensors. *Lowland Technology International*, 19(4), p. 251–256.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Professor Ângelo Zanini pelo apoio institucional e pelo financiamento do projeto, fundamentais para a execução desta pesquisa. Agradecem também ao Engenheiro André Maiolini pela concepção e desenvolvimento da plataforma automatizada utilizada nos experimentos, e ao geólogo Igor Manoel Souza pela contribuição técnica que foi essencial para o avanço do trabalho.