

## Inclinômetro geotécnico digital para o monitoramento remoto em tempo real: projeto, desenvolvimento e testes de laboratório

Digital geotechnical inclinometer for real-time remote monitoring: design, development and laboratory testing

**Gilmar Gonçalves de Brito**; João Paulo da Silva Vasconcelos

*Departamento de Tecnologia da Informação, Instituto Federal de Pernambuco, Brasil, gilmarbrito@recife.ifpe.edu.br*

Roberto Quental Coutinho & Wilson Ramos Aragão Júnior

*Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil*

Gabriel Vanderlei de Oliveira

*Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil*

**RESUMO:** Este artigo descreve o desenvolvimento de um inclinômetro geotécnico digital que visa monitorar encostas com precisão em tempo real. A solução integra tecnologias como sensores MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems); ESP32LoRa (Placa de Desenvolvimento que Integra Comunicação: Wifi, Bluetooth e Rede de Comunicação LoRa - Long Range); GSM (Global System for Mobile Communications) / GPRS (General Packet Radio Service) e A-GPS (Assisted Global Positioning System) / GPS (Global Positioning System) / GNSS (Global Navigation Satellite System) e RTK (Real-Time Kinematic). Testes de laboratório demonstraram que o sistema se manteve dentro de limites aceitáveis para deslocamentos em múltiplos eixos. Destacam-se como vantagens do inclinômetro geotécnico digital em comparação com inclinômetros tradicionais a escalabilidade, o acesso remoto em tempo real, o compartilhamento de dados, o processamento de alto desempenho, a mobilidade, a segurança e o custo reduzido. Três sistemas foram instalados em campo, e os resultados estão sendo analisados para futura publicação. Essa solução representa uma inovação significativa no monitoramento de encostas, oferecendo uma alternativa acessível e eficaz para a engenharia geotécnica.

**PALAVRAS-CHAVE:** talude, monitoramento, deslizamento, perigo, gestão de risco e desastre.

**ABSTRACT:** This article describes the development of a digital geotechnical inclinometer to monitor slopes accurately in real time. The solution integrates technologies such as MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) sensors; ESP32LoRa (Development Board that Integrates Communication: Wifi, Bluetooth and LoRa Communication Network - Long Range); GSM (Global System for Mobile Communications) / GPRS (General Packet Radio Service) and A-GPS (Assisted Global Positioning System) / GPS (Global Positioning System) / GNSS (Global Navigation Satellite System) and RTK (Real-Time Kinematic). Laboratory tests showed that the system remained within acceptable limits for displacements in multiple axes. The advantages of the digital geotechnical inclinometer compared to traditional inclinometers are scalability, real-time remote access, data sharing, high-performance processing, mobility, security and reduced cost. Three systems have been installed in the field, and the results are being analyzed for future publication. This solution represents a significant innovation in slope monitoring, offering an affordable and effective alternative for geotechnical engineering.

**KEYWORDS:** slope, monitoring, landslide, hazards, risk and disaster management.

### 1 INTRODUÇÃO

O inclinômetro tem importância fundamental na engenharia geotécnica, pois permite o monitoramento de deslocamentos dos solos em subsuperfície, dando subsídio, por exemplo, para a avaliação do comportamento e da estabilidade de estruturas geotécnicas, como encostas, fundações e barragens; auxiliando na tomada de decisões relacionadas à gestão de risco e desastres (Seed & Woodward, 1990; Seed & Alba, 2017; Terzaghi et al. 2018; Navarro et al., 2020).

As técnicas tradicionais de monitoramento geotécnico geralmente dependem de instrumentos analógicos e/ou

manuais, que podem apresentar limitações em termos de resolução, sensibilidade e atualização de dados em tempo real (Fonseca et al., 2018; Saadatkhah et al., 2019; Zalewski et al., 2020). Além disso, a obtenção e a transmissão dos dados em áreas de difícil acesso também é um problema, sendo este mais um desafio.

Entretanto, com o avanço da tecnologia, hoje é possível a confecção de um inclinômetro geotécnico automático com acesso remoto em tempo real, utilizado para determinar, detectar ou medir deslocamento horizontal, inclinação ou deformação angular, tal qual o analógico, porém com maior precisão e recursos tecnológicos em geral (Jahan et al., 2020).

O surgimento das tecnologias atuais, tidas como avançadas e inovadoras, podem ser combinadas para o aprimoramento de

dispositivos e equipamentos diversos, melhorando o processo de monitoramento geotécnico. Entre essas tecnologias, destacam-se MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), módulos de prototipação ESP32 e LoRa (Long Range), módulos de comunicação GSM (Global System for Mobile Communications) / GPRS (General Packet Radio Service) e os processos de georreferenciamento com os módulos de GPS (Global Positioning System) / GNSS (Global Navigation Satellite System) e da tecnologia RTK (Real-Time Kinematic) (Zhang et al., 2019; Jahan et al., 2020; Deng et al., 2021).

Para Yu et al. (2020) e Yang et al. (2021), os sistemas de sensores MEMS, que englobam acelerômetros, giroscópios e magnetômetros, oferecem medições precisas de orientação angular, linear e magnética, podendo efetuar medidas de deslocamentos e de posicionamento com precisão até milimétrica. Esses sensores MEMS são capazes de fornecer leituras digitais precisas e atualizadas em tempo real, permitindo uma monitorização do comportamento das estruturas geotécnicas, com excelente precisão e resolução.

A prototipação com os módulos ESP32LoRa combinam a capacidade de processamento e comunicação sem fio do ESP32 (WiFi e bluetooth) com a tecnologia LoRa (Long Range), assim como o espalhamento de espectro, os quais, juntos, oferecem alcance estendido com baixo consumo de energia, além da comunicação física via fio (oriunda da ESP32), por meio da rede lógica serial (I2C, I2S, UART, SPI, SDIO, IR e PWM) que permite a comunicação entre módulos e sensores. Essa união de tecnológicas permite que a aquisição, o pré-processamento e a transmissão dos dados dos sensores MEMS sejam realizados com maior eficiência para o sistema centralizado de monitoramento (Riaz et al., 2021).

De acordo com os pesquisadores Mocanu et al. (2019), Su et al. (2021) e Sheng et al. (2020) a comunicação GSM / GPRS desempenha um papel fundamental no envio dos sinais adquiridos (coletados). Essa tecnologia permite a transferência de dados por meio de redes celulares (chip M2M, sim card), podendo usar mais de uma operadora para garantir redundância do transporte e a eficácia do envio da informação. Como também permite o acesso remoto dos dados e dos processos de monitoramento geotécnico em tempo real, em qualquer lugar e a qualquer momento, proporcionando maior acessibilidade no sistema podendo produzir, alertas e notificações via SMS (Short Message Service), assim como a disponibilidade dos dados históricos para a realização das análises e das tendências em função dos históricos (dados armazenados).

Outras tecnologias, como as utilizadas nos sistemas de GPS / GNSS para o processo de georreferenciamento, estão cada vez mais presentes nos monitoramentos geotécnicos, oferecendo precisão centimétrica e até milimétrica nas determinações (medições) de posicionamento por meio de coordenadas geoespaciais. Essa alta precisão geoespacial é mais um aliado para o monitoramento preciso e na detecção precoce de movimentações ou deformações indesejadas em estruturas geotécnicas (Hussain et al., 2017).

Segundo Cannistraro et al. (2007) e Balzani et al. (2009) o sistema A-GPS (Assisted Global Positioning System) é mais uma ferramenta, ou seja, um aliado tecnológico que entra no time para contribuir na evolução na melhoria da precisão, trabalhando na velocidade de aquisição de sinais de GPS em dispositivos móveis. Trabalhando principalmente em ambientes onde o sinal GPS é fraco ou bloqueado, como áreas urbanas densas ou interiores de edifícios, a aquisição e a precisão do sinal podem ser afetadas.

Nestes casos o sistema A-GPS procura fazer a busca de sinais de GPS, recebendo as informações de assistentes, como os dados de efemérides (posições precisas dos satélites em determinado momento) e almanaques (informações sobre a órbita dos satélites), de uma fonte de assistência na rede lógica (Huang et al., 2020; Liu et al., 2021). Essas informações auxiliam o dispositivo a adquirir e rastrear os sinais de GPS

com maior rapidez e precisão, fornecendo localizações mais precisas e reduzindo o tempo necessário para obter uma fixação de posição.

No decorrer deste artigo, discutiremos detalhadamente os materiais e métodos envolvidos na implementação ou junção destas tecnologias e os resultados obtidos na aplicação dos processos de monitoramento geotécnico.

O objetivo desse trabalho foi apresentar o desenvolvimento de um inclinômetro geotécnico digital integrando a combinação de várias tecnologias, como solução para o monitoramento de encostas, buscando determinar deslocamentos precisos em tempo real.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do protótipo do Inclinômetro Geotécnico Digital em Tempo Real, foi utilizada a associação de dispositivos de tecnologias como:

- IoT, nos processos de interconexões dos sistemas de cada sensor com a internet;
- Sensores MEMS, para a determinação das acelerações em cada ângulo, e do posicionamento e consequentemente convertidos em deslocamentos, assim como o uso da bússola para a determinação de posição;
- Módulos ESP32LoRa, como sistemas de aquisição dos sinais e pré tratamento de sinais assim com o envio dos dados para o próximo sistema;
- Sistemas de telecomunicação GSM / GPRS para o envio das informações para processamento e armazenamento em nuvens;
- Uso de módulos de sistema de posicionamento georeferenciado por meio das tecnologias A-GPS / GPS / GNSS associado com RKT, partindo a triangulação para a determinação da posição exata do ponto em que o inclinômetro se encontra com precisão milimétrica.

Assim, o sistema desenvolvido integra um conjunto de instrumentos e métodos como proposta de inovação tecnológica visando a geração de dados geotécnicos e sua disponibilização. A sequência metodologia foi elaborado na seguinte ordem:

- Desenvolvimento do Sistema de Fornecimento de Energia (SFE);
- Prototipação em laboratório dos sensores em tubo de PVC e desenvolvimento em impressora 3D das juntas homocinéticas em PLA ou material similar;
- Desenvolvimento uma Rede Lógica de Dados-RLD para a comunicação entre os sensores e o módulo de aquisição de sinais (ESP32LoRa);
- Rede lógica para o envio das informações as nuvens para os devidos processamento e armazenamento;
- Testes e calibração.

### 2.1 Sistema de Fornecimento de Energia – SFE

Para atender de forma ininterrupta a demanda pelo fornecimento de energia elétrica foi realizado o levantamento e cálculo da demanda energética do sistema, partindo do princípio de que o sistema trabalhará com as tensões elétricas de 5V e 3,3V, e que precisa alimentar eletricamente os módulos ESP32LoRa, módulo GY91, módulo GSM/GPRS, e módulo GPS/GNSS. Foi escolhido o sistema de energia solar através de painel solar fotovoltaico, e, pensando no período sem a isolamento, considerando tempo mínimo de 8 dias, determinou-se as potencias do sistema considerando as piores condições, assim como a bateria e suas classificações para atender a demanda solicitada.

Para o processo de calibração do sistema de fornecimento de energia foi utilizada a metodologia comparativa, da seguinte forma: (a) foi alimentado eletricamente a entrada com uma

tensão fixa em dado momento e em outro momento com uma tensão variável; (b) com o auxílio de um potenciômetro, ajustou-se a tensão de saídas para as tensões específicas. Este processo foi realizado com o auxílio de um multimetro de referência.

## 2.2 Protótipo

O sistema do protótipo do inclinômetro foi pensado de forma que pudesse ser de fácil transporte, implantação e instalação, da mesma forma posteriores manutenção. Então, foi decidido embarcar este sistema em um cano de PVC de 25mm de diâmetro de forma modular, seccionado os em várias secções de cano de 1m de comprimento cada. Desta forma, para a junção entre as secções foi projetado um sistema de junta homocinéticas, demonstrada na Figura 1a, desenvolvida em uma impressora 3D com o material PLA, com a função de unir mecanicamente as secções e permitir maior flexibilidade no sistema. Na Figura 1b demonstra o a fixação dos sensores no protótipo (cano de PVC).

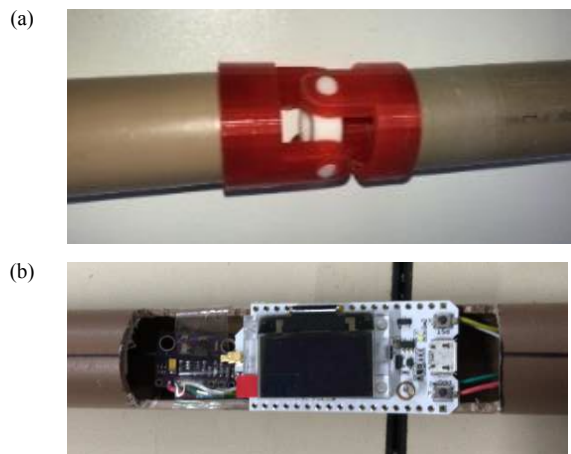


Figura 1: (a) junta homocinética; (b) fixação dos sensores no cano.

No centro de cada secção foi introduzido um módulo de sensores GY91 a um módulo ESP32LoRa, ambos conectado a uma rede lógica I2C. No entanto, a comunicação entre os módulos ESP32LoRa se dar em função de outra rede I2C contida no mesmo módulo, que estão conectados entre si ao módulo GSM / GPRS para o envio das informações ao sistema de processamento e armazenamento em nuvens.

Na parte superior deste sistema fica de fora somente a antena do sistema de comunicação GSM / GPRS, assim como a antena do sistema de A-GPS / GNSS com RTK, para o georeferenciamento do ponto de referência.

## 2.3 Desenvolvimento da Rede Lógica de Dados

### 2.3.1 Módulo ESP32LoRa

O módulo ESP32LoRa 915MHz, tem a função de aquisição e pré-tratamento dos sinais produzidos pelos módulos GY91, que realiza as medições dos respectivos ângulos e, consequentemente, dos possíveis deslocamentos. É neste módulo ESP32LoRa que se formula os pacotes de informações e os enviar para o módulo GSM / GPRS, por meio da segunda rede lógica I2C, a qual transportará as informações através de chip sdcard SIM card, ou chip M2M (Machine-to-Machine) de uma operadora de telefonia móvel local, para os devidos servidores em nuvens para os processamentos, armazenamentos e a disponibilização.

A programação do firmware deste módulo foi realizada no ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino (IDE), versão 1.8.12 (64 bits), para o sistema operacional Windows. A partir desse ambiente foi desenvolvida a solução para o pré-processamento, utilizando a linguagem de programação C e C++.

### 2.3.2 Módulo GSM / GPRS

O módulo GSM / GPRS utilizado para o envio das informações. O sistema GSM para codificar os sinais de voz e dados e o GPRS para transmissão com a tecnologia de comutação em pacotes, que tem taxas de dados mais altas em comparação com o GSM, permitindo que os dispositivos conectados ao sistema GPRS possam ser acessados pela internet, sendo possível a comunicação com servidores remotos e o envio de dados para a nuvem. Destaca-se que a cobertura de rede GSM / GPRS é amplamente estabelecida em muitas partes do mundo, fornecendo cobertura em áreas urbanas e rurais.

É importante ressaltar que, embora seja uma tecnologia estabelecida, está sendo gradualmente substituída por tecnologias mais avançadas, como o 3G, 4G e 5G, porém estas novas tecnologias ainda estão embarcadas no sistema GSM / GPRS. Portanto, dentro deste conceito o sistema se auto atualiza.

Foi colocado um chip de uma operadora de unidade móvel e realizado as configurações de acordo com as informações do datasheet e os ajustes do firmware do equipamento, assim como outros detalhes no software desenvolvido. Lembrando que o módulo GSM / GPRS está também embarcado no módulo ESP32-WROVER-B, cuja informações encontra se disponível no datasheet do dispositivo.

Para aplicação de algumas destas tecnologias prototipada foram desenvolvidos métodos próprios de calibração para as devidas validações. Para o desenvolvimento deste trabalho seguiremos a sequência definindo como os sistemas estão conectados à internet. Cada sensor MEMS está diretamente conectado a um módulo ESP32LoRa, e este módulo se conecta com a internet pelo módulo de aquisição, permitindo realizar a calibração de cada sensor, assim como, atualizar seu firmware sem a necessidade de se deslocar ao local e / ou realizar mecanicamente a retirada do dispositivo do lugar de origem para possível manutenção, em função disponibilização desta funcionalidade.

## 2.4 Testes e calibração

### 2.4.1 Determinação da sensibilidade do inclinômetro

Para o processo da obtenção da sensibilidade do equipamento desenvolvido, foi realizado o método de comparação com um tubo utilizado no inclinômetro convencional. Para isso, foi utilizado uma prensa automática e efetuada a medição da tensão de deformação para cada tensão aplicada na extensão de 2m do tubo do inclinômetro convencional em alumínio de 75mm de diâmetro (Figura 2a) e da mesma forma com a extensão de 2m do cano de 32mm com o sistema do inclinômetro dentro (Figura 2b).

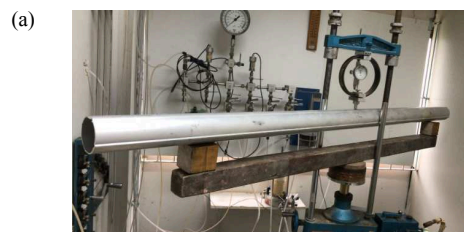




Figura 2: (a) cano do inclinômetro convencional em alumínio; (b) medição da deformação do cano de 32mm.

#### 2.4.2 Calibração do sistema inclinômetro

Quanto a metodologia adotada para o processo de calibração foi realizada fazendo as comparações dos valores medindo via software no notbook do inclinômetro com os valores medido com instrumentos (régua e paquímetro). As medidas foram efetuadas utilizando se os seguintes procedimentos:

- realizou se deslocamentos horizontais acompanhado com régua e o paquímetro;
- no ponto em que este deslocamento foi realizado (altura) também foi utilizado uma trena métrica;
- os deslocamentos foram em direções horizontais, nos sentidos norte, sul, leste e oeste; acompanhado por uma bússola de bolso e outra via software pelo celular;
- os valores dos deslocamentos foram comparados com os valores apresentado no sistema via software em 3D e 2D;
- e em casos de diferença, as medidas foram refeitas, e em caso de confirmação dava se como aferida, sendo repetidas posteriores.

Estas medidas foram realizadas no laboratório em bancadas (Figura 3a), e outra parte sobre o pilar da estrutura de uma edificação (Figura 3b). Nesta etapa ainda não havia sido fracionado (de metro a metro) o cano do inclinômetro, sendo ainda inteiro, com 8m de extensão.

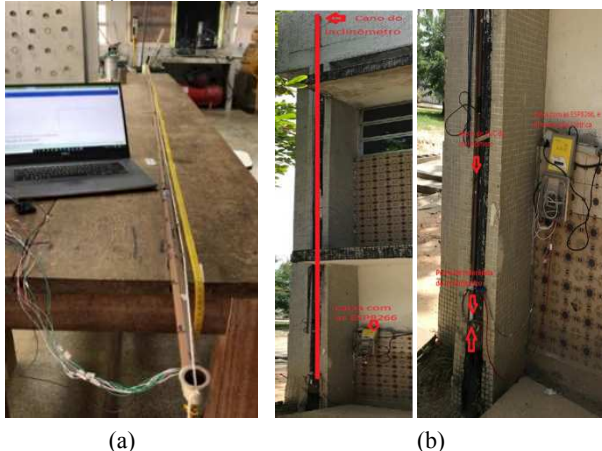


Figura 3: (a) Sistema do inclinômetro para medições de deslocamento em bancada no laboratório; (b) Fixação da haste do inclinômetro no pilar da estrutura da edificação.

A metodologia de aferição do inclinômetro quanto ao deslocamento na direção Norte-Sul, foi realizado nos pontos de 3m, 4m, 6m e 8m, as medidas efetuadas com uso de uma régua (Figura 4a). Além disso, o deslocamento na direção Leste-Oeste

foram utilizando um paquímetro (Figura 4b), sendo a forma de medição similar as anteriores.

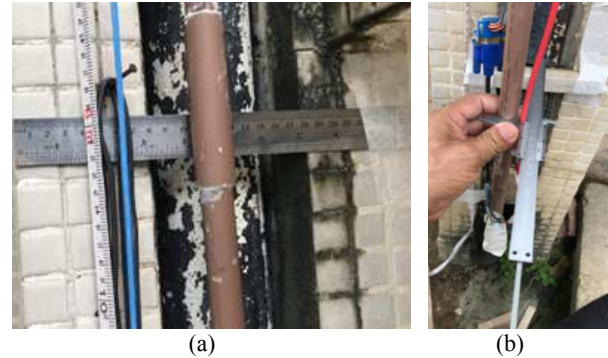


Figura 4: Medidas na direção: (a) Norte- Sul; (b) Leste Oeste.

Foi utilizado também uma bússola para a determinação do sentido (norte, sul, leste, oeste). Também foi construído um gráfico (tipo rosa dos ventos) em um papel A4, com círculos circunscritos regulares distanciado de 1cm (raio), e foi colocado em uma base fixa (com uma bússola sobre esta base direcionado o Norte) e com a extremidades do inclinômetro em movimento sobre ela variando as direções e os sentidos (norte, sul, leste, oeste). A Figura 5, demonstra a forma em que esta metodologia foi procedida.



Figura 5: Demonstração do processo de aferição dos deslocamentos com uso de bússola e gráfico da rosa dos ventos.

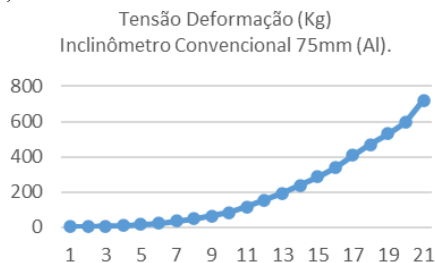
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema de gerenciamento de energia possibilitou o fornecimento e controle de energia elétrica, sendo exclusivo de uso da energia solar produzido por este sistema, não sendo necessária a utilização de outra fonte de energia elétrica. Além disso, a energia elétrica produzida armazenada em uma bateria 18AH pode fornecer uma autonomia mínima de 14 dias sem as isolações necessária para a produção de energia.

Outro detalhe de igual importância é a comparação da sensibilidade da relação da tensão de deformação de 1:78 do inclinômetro desenvolvido comparando com o inclinômetro convencional, ou seja, enquanto o inclinômetro desenvolvido deformou com a tensão de aproximadamente 9Kg, o

inclinômetro convencional deformou com aproximadamente 700Kg, conforme demonstrado na Figura 6. Desta forma, pode ser que se consiga determinar velocidade de deslocamento nos perfis horizontais no solo. A continuidade do estudo determinará, ou não.

(a)



(b)

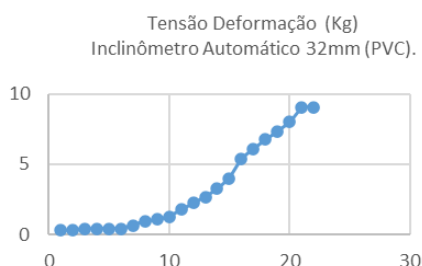


Figura 6: (a) tubo do inclinômetro convencional; (b) cano do sistema desenvolvido.

A avaliação do sistema do inclinômetro, realizada em laboratório pelo método de calibração manteve uma boa correlação dos dados obtidos. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 1, com as medidas de comparação manuais dos deslocamentos (cm) e os dados produzidos pelo o inclinômetro, em resposta as variações de direção e sentidos dos eixos X, Y e Z, nos pontos específicos de 4m e 8m, pontos estes decididos aleatoriamente.

Verifica-se, pelos valores dos desvios padrões e coeficiente de regressão linear obtidos, que para qualquer alteração da direção e sentidos dos deslocamentos realizados, as margens de erros e a acurácia do sistema, mantiveram-se dentro do limite aceitável para todos eixos analisados.

Tabela 1: Deslocamentos Horizontais, eixo X, (Norte – Sul); eixo Z, (Leste – Oeste) nos pontos 4m e 8m; e eixo Y (vertical)

Manual (cm)	eixo X -4m	eixo Z -4m	eixo X - 8m	eixo Z -8m	eixo Y
1	1,00 ± 0,09	0,99 ± 0,09	1,01 ± 0,08	1,03 ± 0,12	1.04 ± 0.06
2	2,12 ± 0,14	2,17 ± 0,10	2,01 ± 0,04	2,02 ± 0,10	2.01 ± 0.02
3	3,07 ± 0,12	3,00 ± 0,19	2,99 ± 0,08	3,00 ± 0,11	2.98 ± 0.05
4	3,95 ± 0,29	4,06 ± 0,13	3,99 ± 0,06	4,04 ± 0,09	4.01 ± 0.08
5	5,01 ± 0,24	5,13 ± 0,15	4,99 ± 0,07	5,04 ± 0,12	5.00 ± 0.12
6	6,03 ± 0,19	6,13 ± 0,09	5,99 ± 0,06	6,03 ± 0,12	5.99 ± 0.04
7	7,06 ± 0,15	7,13 ± 0,09	6,99 ± 0,09	7,05 ± 0,09	7.00 ± 0.03
8	8,01 ± 0,10	8,22 ± 0,23	7,99 ± 0,05	8,07 ± 0,12	8.06 ± 0.12
9	9,06 ± 0,12	9,12 ± 0,17	8,98 ± 0,09	9,07 ± 0,15	-
10	10,31 ± 0,12	10,17 ± 0,14	10,09 ± 0,08	10,11 ± 0,14	-
50	50,01 ± 0,91	49,51 ± 0,55	50,07 ± 0,73	50,08 ± 0,62	-
100	100,64 ± 0,85	100,31 ± 1,03	100,56 ± 0,78	100,99 ± 0,85	-
	R <sup>2</sup> = 1.00	R <sup>2</sup> = 1.00	R <sup>2</sup> = 0.9997	R <sup>2</sup> = 1.00	R <sup>2</sup> = 0.9999

#### 4 CONCLUSÕES

O sistema do Inclinômetro Geotécnico Digital em Tempo Real desenvolvido integrou hardware (módulos) e dispositivos computacionais (software e firmware), associados a tecnologias MEMS (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro), tecnologias de rede lógica IOT, tecnologias de comunicação LoRa, GSM e GPRS, A-GPS/GNSS com RTK. Estas junções tecnológicas contribuíram para que o inclinômetro produzissem resultados dentro do esperado, demonstrando que o modelo proposto pode fornecer informações precisas dos aspectos geotécnicos com relação aos deslocamentos horizontais em estabilidade de encostas e aos processos de monitoramentos e predições dos possíveis deslizamento de encostas.

Em termos de redução dos custos operacionais e de materiais utilizados neste projeto, o sistema pode oferecer uma estratégia acessível e confiável em comparação a outros modelos de sistemas existentes no mercado. Além disso, o sistema proposto demonstra contribuições únicas no concernente à amplitude de análise e perspectiva de estabelecimento de um método abrangente para a investigação e monitoramento de encostas, taludes e barragens, com sensibilidade de tensão deformação de aproximadamente 78 vezes menor quando comparando com o sistema convencional com o tubo de alumínio de 75mm de diâmetro.

Por fim, a combinação dessas tecnologias avançadas é possível superar os desafios enfrentados pelos processos de monitoramento geotécnico tradicionais, oferecendo uma série de benefícios, como o armazenamento escalável, o acesso remoto, o compartilhamento fácil de dados e o processamento computacional de alto desempenho.

## 5 REFERENCES

- Balzani D., Frodella R., Giretti A., and Paolanti A. 2009. A-GPS and Galileo performance analysis for geotechnical monitoring. In International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium.
- Deng H., et al. 2021. Design and implementation of an IoT-based geotechnical monitoring system using LoRa and GSM/GPRS Technologies. *Sensors*, 21(1), 182.
- Liu F., Li H., and X. Yin. 2021. A-GPS-Assisted Monitoring and Early Warning System for Landslide Displacement. *Advances in Civil Engineering*.
- Hussain A., et al. 2017. Monitoring the deformation of a highway bridge using GNSS. *Journal of Applied Geodesy*, 11(2), 79-88.
- Jahan S., et al. 2020. Wireless sensor networks for geotechnical monitoring: a review. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 4237-4265.
- Huang L., Shen Z., and Li Q. 2020. Monitoring landslide deformation using A-GPS and MEMS Accelerometers. *Sensors*, 20(5).
- Cannistraro M., Rispoli F., and Tramutoli V. 2007. Monitoring landslide displacements with GPS and A-GPS techniques: a case study in southern Italy. In: International Association of Geodesy Symposia.
- Mocanu V., et al. 2019. Remote monitoring of slopes stability using a low-cost wireless sensor network based on GSM / GPRS technology. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 318, 012030.
- Navarro I. J., et al. 2020. Monitoring techniques for geotechnical structures: a review of wireless sensor networks. *Sensors*, 20(23), 6958.
- Riaz, A., et al. 2021. Wireless sensor network for slope stability monitoring using LoRa Technology. *Geotechnical Special Publication*, 322, 95-104.
- Saadatkah N., et al. 2019. The Role of Sensor Technologies in Geotechnical Monitoring. *Geotechnical Special Publication*, 319, 168-176.
- Seed H.B., and De Alba, P. 2017. *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. CRC Press.
- Seed H.B., and Woodward R.J. 1990. Monitoring and Data Management. In: *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*, edited by R. W. Boulanger and J. T. Idriss, 2nd ed., Vol. 2, Chapter 7. Kluwer Academic Publishers.
- Sheng D., et al. 2020. Development of an automatic inclinometer monitoring system based on GSM / GPRS. *Advances in Civil Engineering*, 8840633.
- Su F., et al. 2021. GSM/GPRS-Based monitoring system for slope stability evaluation. *Sensors*, 21(9), 3224.
- Terzaghi K., Peck R.B., and Mesri, G. 2018. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
- Fonseca A. V. da, et al. 2018. Challenges and innovation in geotechnical monitoring. *Geotechnical Special Publication*, 288, 381-389.
- Yang X., et al. 2021. Accuracy analysis of MEMS-Based inclinometer with compensation algorithm for tunnel monitoring. *Sensors*, 21(2), 587.
- Yu X., et al. 2020. Calibration and performance evaluation of low-cost MEMS inclinometers for structural health monitoring. *Sensors*, 20(9), 2703.
- Zalewski P.M., et al. 2020. Review of Traditional and Emerging Geotechnical Monitoring Technologies. *Geotechnical Testing Journal*, 43(3), 20200009.
- Zhang Z., et al. 2019. An integrated IoT system for long-term and real-time monitoring of deep excavation slope movements. *Sensors*, 19(9), 2087.

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*