

AUTOMAÇÃO NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0 PARA MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

AUTOMATION IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0 FOR GEOTECHNICAL
MONITORING

Engenharias • 27/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/779741041](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/779741041)

Bryan Almeida da Silva¹

Aderian dos Santos Rodrigues²

José Vinicius Ferreira Ribeiro³

Shalon Pedro Almeida Ferreira⁴

Marcelo Rassy Teixeira⁵

RESUMO

O monitoramento geotécnico desempenha papel fundamental na avaliação da estabilidade e segurança de estruturas de terra, permitindo o acompanhamento de parâmetros hidráulicos e mecânicos associados ao comportamento dos maciços. Entretanto, métodos convencionais baseados em leituras manuais apresentam limitações relacionadas à baixa frequência de aquisição de dados, dependência de operações presenciais e dificuldades de resposta em situações críticas. Nesse contexto, o presente artigo teve como objetivo discutir os desafios do monitoramento geotécnico convencional e as tendências da automação aplicada à geotecnia no contexto da Indústria 4.0. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica narrativa, com base em estudos nacionais e internacionais relacionados à instrumentação geotécnica, Internet das Coisas, sensores inteligentes, sistemas automatizados de aquisição de dados e arquiteturas integradas de monitoramento. Os estudos analisados demonstram que a incorporação de tecnologias digitais vem promovendo mudanças significativas nos processos de monitoramento geotécnico, permitindo aquisição contínua de dados, integração entre plataformas e ampliação da capacidade preditiva dos sistemas. Além disso, tecnologias como sensores IoT, Digital Twin, protocolos de comunicação e bancos de dados temporais contribuem para fortalecimento das estratégias de gestão de risco e segurança operacional. Entretanto, a literatura também evidencia desafios relacionados à interoperabilidade entre sistemas, confiabilidade das redes de sensores, segurança dos dados, manutenção da infraestrutura tecnológica e necessidade de capacitação técnica especializada. Conclui-se que a automação representa uma tendência crescente na modernização do monitoramento geotécnico, ampliando a eficiência operacional e a capacidade de análise das estruturas monitoradas, embora sua

consolidação ainda dependa da superação de limitações técnicas e operacionais.

Palavras-chave: monitoramento geotécnico; automação; Indústria 4.0; Internet das Coisas; instrumentação geotécnica.

ABSTRACT

Geotechnical monitoring plays a fundamental role in evaluating the stability and safety of earth structures, enabling the tracking of hydraulic and mechanical parameters associated with the behavior of soil and rock masses. However, conventional methods based on manual readings present limitations related to the low frequency of data acquisition, dependence on on-site operations, and difficulties in responding to critical situations. In this context, the present study aimed to discuss the challenges of conventional geotechnical monitoring and the trends in automation applied to geotechnics within the framework of Industry 4.0. The research was developed through a narrative literature review, based on national and international studies related to geotechnical instrumentation, the Internet of Things, smart sensors, automated data acquisition systems, and integrated monitoring architectures. The analyzed studies demonstrate that the incorporation of digital technologies has been promoting significant changes in geotechnical monitoring processes, enabling continuous data acquisition, integration between platforms, and enhanced predictive capabilities of systems. Furthermore, technologies such as IoT sensors, Digital Twin, communication protocols, and time-series databases contribute to strengthening risk management strategies and operational safety. However, the literature also highlights challenges related to system interoperability, reliability of sensor networks, data security, maintenance of technological infrastructure, and the need for specialized technical training. It is concluded that automation

represents a growing trend in the modernization of geotechnical monitoring, enhancing operational efficiency and the analytical capacity of monitored structures, although its consolidation still depends on overcoming technical and operational limitations.

Keywords: Geotechnical monitoring; Automation; Industry 4.0; Internet of Things; Geotechnical instrumentation.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento geotécnico constitui uma das principais ferramentas para avaliação da estabilidade e do desempenho de estruturas de terra, como barragens, aterros sanitários, taludes e fundações. A obtenção de dados relacionados à pressão neutra, deformações e deslocamentos permite identificar alterações no comportamento do maciço e subsidiar medidas preventivas voltadas à gestão de risco e à segurança operacional.

Apesar dos avanços observados na instrumentação geotécnica, métodos convencionais baseados em leituras manuais ainda são amplamente empregados em obras civis e ambientais. Segundo França e Honório (2024), esse modelo apresenta limitações relacionadas à baixa frequência de aquisição de dados e à dependência de operações presenciais, dificultando a identificação antecipada de anomalias hidráulicas e estruturais. Brassington (2017) ressalta ainda que a necessidade de deslocamento até os instrumentos reduz a periodicidade das medições e restringe o acompanhamento das variações do comportamento geotécnico ao longo do tempo.

Além das limitações operacionais, a confiabilidade dos registros pode ser comprometida por falhas de medição, inconsistências de

coleta e ausência de integração entre os dados obtidos em campo. Germaine e Germaine (2009) destacam que a qualidade das informações geotécnicas depende diretamente da calibração instrumental e da repetibilidade das leituras, fatores frequentemente afetados em campanhas manuais. Em situações críticas, como eventos pluviométricos intensos ou instabilidades progressivas, essas limitações tornam-se ainda mais evidentes, principalmente devido à dificuldade de obtenção de informações em tempo oportuno (Cardoso, 2025).

Nesse contexto, os avanços associados à Indústria 4.0 vêm promovendo mudanças significativas nos processos de monitoramento e instrumentação. A integração entre sensores inteligentes, sistemas embarcados, redes de comunicação e plataformas digitais possibilitou o desenvolvimento de arquiteturas automatizadas capazes de ampliar a frequência das medições, reduzir falhas operacionais e melhorar a confiabilidade dos dados. De acordo com Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), a digitalização dos sistemas físicos representa uma transformação estrutural nos processos industriais, baseada na conectividade e na automação inteligente.

Aplicadas à geotecnia, essas tecnologias permitem a implementação de sistemas integrados de aquisição, transmissão e processamento de dados, favorecendo o monitoramento remoto e a análise contínua de parâmetros geotécnicos. Estudos recentes demonstram aplicações de sensores IoT, modelos digitais, algoritmos de aprendizado de máquina e sistemas automatizados de alerta em estruturas geotécnicas, evidenciando ganhos relacionados à capacidade preditiva, redução de riscos operacionais

e suporte à tomada de decisão (Carri et al., 2021; Abraham et al., 2020; Piciullo et al., 2022).

Apesar dos avanços tecnológicos observados nas últimas décadas, a incorporação de soluções automatizadas ao monitoramento geotécnico ainda ocorre de forma heterogênea, marcada por dificuldades relacionadas à interoperabilidade entre plataformas, segurança de dados, confiabilidade das redes de sensores e gerenciamento de grandes volumes de informações. Além disso, aspectos associados à manutenção, calibração instrumental, custos de implantação e ausência de padronização tecnológica permanecem como fatores limitantes para a consolidação da automação em larga escala no setor geotécnico (Soga et al., 2019; Liu et al., 2025). Esse cenário evidencia a necessidade de discussões mais aprofundadas acerca das potencialidades, limitações e desafios envolvidos na transformação digital aplicada à engenharia geotécnica.

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo discutir os desafios do monitoramento geotécnico convencional e as tendências da automação aplicada à geotecnia no contexto da Indústria 4.0. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica narrativa com base em estudos nacionais e internacionais relacionados à instrumentação geotécnica, sistemas automatizados de aquisição de dados, Internet das Coisas e arquiteturas inteligentes de monitoramento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Limitações Operacionais do Monitoramento Geotécnico Convencional

O monitoramento geotécnico convencional permanece amplamente utilizado em obras civis e ambientais para acompanhamento das condições hidráulicas e mecânicas de estruturas de terra. Esse modelo é baseado, predominantemente, em campanhas periódicas de campo, nas quais instrumentos como piezômetros, inclinômetros e marcos superficiais são utilizados para obtenção de dados relacionados à estabilidade e ao comportamento dos maciços.

Embora consolidado na prática da engenharia geotécnica, esse tipo de monitoramento apresenta limitações importantes quanto à continuidade das medições e à capacidade de acompanhamento das variações do comportamento estrutural ao longo do tempo. França e Honório (2024) destacam que a baixa frequência de aquisição de dados dificulta a identificação antecipada de anomalias hidráulicas e estruturais, comprometendo a representação do comportamento hidromecânico das estruturas monitoradas.

Outro fator limitante está relacionado à dependência de operações presenciais para realização das leituras. Conforme Brassington (2017), métodos convencionais exigem deslocamentos frequentes das equipes técnicas até os instrumentos instalados em campo, reduzindo a periodicidade das medições e dificultando o monitoramento em estruturas extensas ou áreas de difícil acesso. Em situações críticas, essa dependência operacional pode comprometer a continuidade das informações justamente nos períodos de maior necessidade de acompanhamento.

Além disso, a confiabilidade dos dados obtidos manualmente depende diretamente da calibração instrumental, da padronização dos procedimentos e da repetibilidade das leituras. Germaine e

Germaine (2009) ressaltam que falhas operacionais, inconsistências de registro e variações metodológicas podem comprometer a qualidade das informações geotécnicas, reduzindo a precisão das análises e interpretações realizadas a partir dos dados coletados.

As limitações do monitoramento convencional tornam-se ainda mais evidentes em cenários sujeitos a eventos extremos. Gupchup et al. (2019) observam que dificuldades de acesso durante períodos críticos frequentemente interrompem campanhas de monitoramento, comprometendo séries históricas e reduzindo a eficiência de sistemas preventivos. Em estudos aplicados a aterros sanitários, Giorgini (2019) e Batista (2010) destacam que a ausência de registros contínuos dificulta a interpretação do comportamento geomecânico das estruturas e limita a adoção de medidas preventivas em tempo adequado.

Resultados semelhantes foram observados por Carmo (2021) ao analisar o sistema de monitoramento geotécnico do Aterro Sanitário de Brasília. O autor verificou que limitações relacionadas à frequência das leituras e à integração entre instrumentos reduziam a capacidade de resposta frente a possíveis situações de instabilidade, evidenciando fragilidades inerentes aos métodos convencionais de monitoramento.

Nesse contexto, Cardoso (2025) ressalta que sistemas manuais apresentam menor eficiência em situações caracterizadas por rápidas alterações das condições geotécnicas, como chuvas intensas e movimentações progressivas de taludes. A ausência de dados em tempo oportuno dificulta a adoção de ações preventivas e amplia os riscos associados à resposta tardia diante de cenários críticos.

Dessa forma, as limitações associadas ao monitoramento convencional evidenciam a necessidade de soluções capazes de ampliar a frequência de aquisição de dados, reduzir falhas operacionais e fornecer informações mais consistentes para suporte à gestão e à segurança de estruturas geotécnicas.

2.2. Transformação Digital e Automação no Contexto da Geotecnia

A evolução das tecnologias digitais e dos sistemas automatizados vem promovendo mudanças significativas nos processos de monitoramento e controle em diferentes áreas da engenharia. Inserido nesse contexto, o conceito de Indústria 4.0 representa um novo paradigma tecnológico baseado na integração entre sistemas físicos e digitais, conectividade entre dispositivos, automação de processos e utilização contínua de dados para suporte operacional e tomada de decisão. Segundo Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), essa transformação está associada à incorporação de sistemas inteligentes capazes de integrar sensores, máquinas e plataformas computacionais em ambientes conectados.

Na engenharia geotécnica, a aplicação desses conceitos tem favorecido a modernização dos sistemas de instrumentação e monitoramento, permitindo a substituição gradual de métodos convencionais por arquiteturas automatizadas de aquisição e processamento de dados. Conforme discutido por Carri et al. (2021), a integração entre sensores automáticos, redes de comunicação e plataformas digitais possibilita o acompanhamento contínuo das condições geotécnicas de estruturas como barragens, aterros sanitários, taludes e fundações.

Essa transformação amplia significativamente a capacidade de monitoramento das estruturas, principalmente em relação à frequência de aquisição de dados e à redução de falhas operacionais associadas às campanhas manuais. Carri et al. (2021) destacam que sistemas automatizados baseados em Internet das Coisas permitem maior precisão na obtenção das informações, além de favorecer a implementação de sistemas de alerta precoce e estratégias de manutenção preditiva.

Além da automação da coleta de dados, a Indústria 4.0 aplicada à geotecnia também envolve a integração entre armazenamento, processamento e análise das informações obtidas em campo. Nesse cenário, o monitoramento deixa de assumir caráter exclusivamente pontual e passa a operar de forma contínua e integrada, permitindo maior rastreabilidade das variáveis monitoradas e melhor suporte à tomada de decisão em estruturas críticas.

Outro avanço relevante nesse contexto está relacionado à aplicação da tecnologia Digital Twin. Segundo Tan, Wu, Li e Guo (2025), a utilização de modelos digitais conectados em tempo real aos sensores instalados em campo possibilita acompanhar o comportamento das estruturas ao longo de todo o seu ciclo operacional. Essa integração permite a realização de simulações, previsões e diagnósticos com base em dados históricos e medições contínuas. De forma complementar, Wang, Rezaei e Hicks (2025) ressaltam que a associação entre modelos computacionais e sensoriamento contínuo representa uma alternativa promissora para lidar com a heterogeneidade dos materiais geológicos e ampliar a capacidade de interpretação do comportamento geotécnico.

A incorporação da Indústria 4.0 à engenharia geotécnica representa, portanto, uma mudança de paradigma nos processos de monitoramento. A substituição de medições episódicas por sistemas automatizados e conectados amplia a capacidade de acompanhamento das estruturas, reduz vulnerabilidades operacionais e fortalece estratégias de prevenção e gestão de risco. Nesse contexto, a automação deixa de representar apenas uma inovação tecnológica e passa a constituir elemento estratégico para a modernização do monitoramento geotécnico contemporâneo.

2.3. Tecnologias Aplicadas Ao Monitoramento Geotécnico Automatizado

O avanço da automação e da conectividade digital impulsionou o desenvolvimento de tecnologias capazes de ampliar significativamente a eficiência dos sistemas de monitoramento geotécnico. Sensores inteligentes, redes de comunicação remota, plataformas de processamento de dados e sistemas automatizados de alerta vêm sendo incorporados progressivamente às estruturas geotécnicas, permitindo maior continuidade operacional e melhoria na capacidade de identificação de condições críticas.

Entre as aplicações recentes, destacam-se os sistemas baseados em sensores integrados a redes de transmissão de dados em tempo real. Abraham et al. (2020) desenvolveram um sistema de monitoramento para áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais no Himalaia utilizando sensores de inclinação conectados a módulos de comunicação remota alimentados por painéis fotovoltaicos. O sistema possibilita o registro contínuo das deformações do solo e a emissão automática de alertas diante da identificação de padrões associados a possíveis rupturas.

Soluções semelhantes vêm sendo aplicadas em sistemas de alerta precoce associados ao monitoramento de encostas e estruturas geotécnicas. Werthmann et al. (2024) apresentam uma arquitetura composta por sensores de deformação linear, inclinômetros e estações pluviométricas integrados a um sistema de processamento capaz de validar alertas a partir da convergência entre diferentes variáveis monitoradas. Segundo os autores, a integração entre múltiplas fontes de dados contribui para redução de falsos alertas e aumento da confiabilidade operacional dos sistemas.

A utilização de sensores conectados a redes IoT também vem ampliando a capacidade de monitoramento de parâmetros hidráulicos e geomecânicos. Piciullo et al. (2022) aplicaram sensores de umidade, temperatura e pressão de poros integrados a modelos hidromecânicos desenvolvidos no software GeoStudio para monitoramento de encostas na Noruega. Os dados coletados alimentavam algoritmos capazes de reestimar continuamente o fator de segurança dos taludes, permitindo acionamento automático de alertas diante da superação de parâmetros críticos.

Além das aplicações em campo, estudos recentes têm enfatizado a importância da interoperabilidade entre sensores, sistemas computacionais e plataformas de comunicação. Akanbi (2023) propõe uma arquitetura baseada em microsserviços para sistemas multiriscos, integrando dados provenientes de diferentes sensores ambientais e permitindo emissão de alertas em múltiplos canais de comunicação. Segundo o autor, a capacidade de integração entre diferentes tecnologias constitui elemento fundamental para consolidação de sistemas inteligentes de monitoramento.

A Internet das Coisas desempenha papel central nesse processo de integração tecnológica. Patel e Patel (2016) definem a IoT como uma infraestrutura baseada na conexão entre objetos físicos e sistemas digitais por meio de tecnologias interoperáveis. Aplicada ao monitoramento geotécnico, essa abordagem permite aquisição contínua de dados relacionados à pressão de poros, deslocamentos e umidade, favorecendo maior frequência de monitoramento e ampliação da confiabilidade das informações obtidas.

Outras tecnologias também vêm ampliando o escopo do monitoramento geotécnico contemporâneo. Torres, Ramírez e Fórnes (2021) demonstram a aplicação de imagens InSAR na identificação de deformações milimétricas em plataformas de lixiviação na Mina Utunsa, no Peru. Segundo os autores, a integração entre dados satelitais e sistemas de monitoramento em campo possibilita antecipação de falhas estruturais e suporte mais eficiente à tomada de decisão.

O uso de veículos aéreos não tripulados também tem apresentado crescimento significativo nas atividades de inspeção e monitoramento. Otto et al. (2018) destacam que drones permitem ampliar o acesso a áreas de difícil alcance, aumentar a segurança operacional e reduzir custos associados às inspeções convencionais. Além disso, a integração dessas plataformas com sensores e sistemas automatizados amplia a capacidade de obtenção de dados em áreas extensas e de elevada complexidade operacional.

No contexto da integração e gerenciamento de informações, Losier et al. (2012) apresentam o sistema Geodecisão, desenvolvido para monitoramento geotécnico de pilhas de minério sobre solos moles. A plataforma integra instrumentos geotécnicos, processamento

automatizado de dados e visualização georreferenciada em ambiente WebGIS, permitindo emissão de alertas, análise de deslocamentos e suporte à gestão operacional das estruturas monitoradas.

Dessa forma, observa-se que as tecnologias emergentes vêm promovendo uma transformação significativa nos processos de monitoramento geotécnico. A integração entre sensores inteligentes, comunicação remota, processamento automatizado e plataformas digitais amplia a capacidade de aquisição e interpretação dos dados, fortalecendo estratégias de prevenção, gestão de risco e tomada de decisão em estruturas geotécnicas.

2.4. Integração de Sistemas e Arquiteturas Inteligentes de Monitoramento

A implementação de sistemas automatizados de monitoramento geotécnico depende da integração entre dispositivos de aquisição, protocolos de comunicação, plataformas de processamento e sistemas de armazenamento de dados. Nesse contexto, as arquiteturas inteligentes constituem a base operacional responsável por permitir a coleta, transmissão, organização e análise contínua das informações provenientes dos instrumentos instalados em campo.

Entre os principais componentes dessas arquiteturas, destaca-se o Controlador Lógico Programável (CLP), amplamente utilizado em processos industriais automatizados. Segundo Hussein, Yaseen e Mustafa (2025), os CLPs desempenham papel fundamental no controle de processos, realizando leitura de sinais de entrada, processamento lógico e acionamento de dispositivos de saída com

elevada confiabilidade operacional. No contexto da automação aplicada ao monitoramento, esses dispositivos permitem integrar sensores, executar rotinas de controle e garantir estabilidade na aquisição dos dados.

Macedo (2018), ao analisar aplicações de automação industrial na Universidade Federal do Tocantins, destaca a eficiência e a confiabilidade dos CLPs em sistemas de controle automatizado. Esses dispositivos apresentam elevada robustez operacional e ampla aplicabilidade em ambientes que exigem funcionamento contínuo e processamento determinístico das informações.

Associado aos sistemas de controle, o Node-RED vem sendo utilizado como ferramenta de integração entre dispositivos, protocolos de comunicação e plataformas digitais. Desenvolvido inicialmente pela IBM, o Node-RED utiliza programação visual baseada em fluxos, permitindo integração simplificada entre sensores, serviços em nuvem e sistemas supervisórios. Hussein, Yaseen e Mustafa (2025) ressaltam que essa plataforma facilita a implementação de aplicações voltadas ao monitoramento remoto, controle em tempo real e soluções baseadas em Internet das Coisas.

Calabrez (2019) destaca que o Node-RED possibilita desenvolvimento rápido e intuitivo de sistemas automatizados, favorecendo a organização e o processamento de dados provenientes de diferentes dispositivos. De forma complementar, Sosa, Kiraly e Rodríguez (2018) ressaltam a flexibilidade da plataforma em ambientes computacionais heterogêneos, especialmente em aplicações distribuídas entre dispositivos locais e serviços em nuvem.

A comunicação entre sensores, controladores e plataformas digitais é frequentemente realizada por meio do protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Conforme Hussein, Yaseen e Mustafa (2025), o MQTT consiste em um protocolo leve baseado no modelo publish/subscribe, desenvolvido para transmissão eficiente de dados em ambientes conectados. Sua aplicação em sistemas IoT permite reduzir consumo de recursos computacionais e latência na comunicação entre dispositivos distribuídos.

Aplicações práticas envolvendo MQTT e Node-RED foram apresentadas por Medina-Pérez et al. (2021), que utilizaram essas tecnologias em sistemas de monitoramento ambiental integrados a sensores distribuídos. Os autores destacam a eficiência do protocolo na transmissão contínua de dados e na integração entre dispositivos conectados em rede.

Após a aquisição e transmissão das informações, torna-se necessário armazenar grandes volumes de dados temporais gerados continuamente pelos sensores. Nesse contexto, o TimescaleDB vem sendo utilizado como solução voltada ao gerenciamento de séries temporais. Segundo Struckov et al. (2019), essa tecnologia consiste em uma extensão do PostgreSQL otimizada para armazenamento, consulta e processamento de dados cronológicos em larga escala.

Entre as principais características do TimescaleDB destacam-se a partição automática de dados, compatibilidade com linguagem SQL e capacidade de escalabilidade para aplicações industriais e científicas. Mostafa et al. (2022) observaram desempenho superior dessa plataforma em aplicações de Internet das Coisas Industrial, especialmente em operações relacionadas à inserção e análise de grandes volumes de dados. Martinviita (2018) também destaca sua

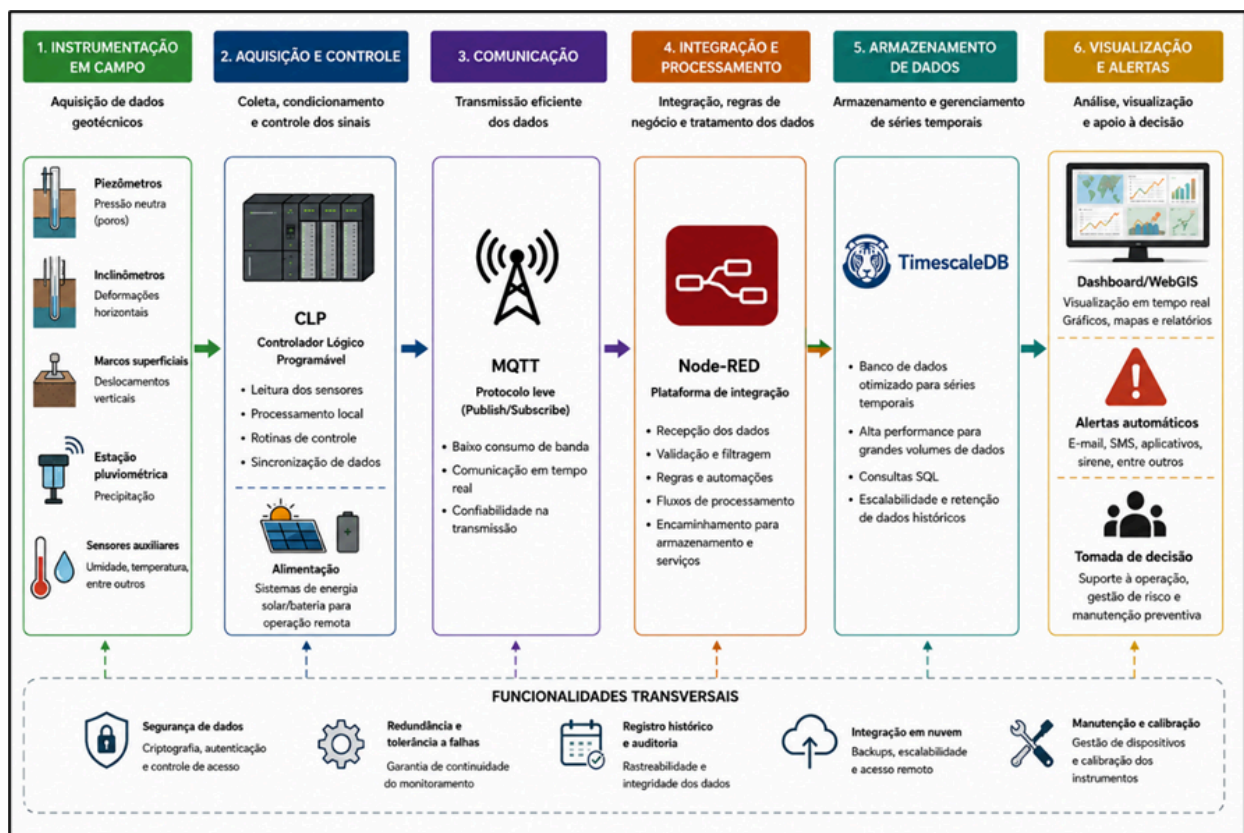
adequação para aplicações que demandam armazenamento contínuo e acesso rápido às informações históricas.

De forma integrada, essas tecnologias permitem estruturar arquiteturas inteligentes capazes de conectar sensores, sistemas de controle, protocolos de comunicação e bancos de dados em ambientes automatizados de monitoramento. Nesse fluxo operacional, os CLPs realizam aquisição das informações em campo, os protocolos MQTT viabilizam a transmissão dos dados, o Node-RED executa integração e processamento das informações e o TimescaleDB realiza armazenamento e gerenciamento histórico das séries temporais.

Assim, as arquiteturas inteligentes representam elemento central na consolidação da automação aplicada ao monitoramento geotécnico, permitindo maior integração entre dispositivos, aumento da confiabilidade operacional e ampliação da capacidade de análise contínua das condições das estruturas monitoradas.

A figura 01, demonstra a partir de um fluxograma, a arquitetura de um sistema automatizado para monitoramento geotécnico com a utilização de sensores.

Figura 01 – Fluxograma de um sistema automatizado para monitoramento geotécnico, com uso de sensores.



Fonte: Próprio autor (2026), adaptado de Hussein; Yaseen; Mustafa (2025).

2.5. Barreiras Técnicas e Operacionais da Automação Geotécnica

Embora os avanços tecnológicos tenham ampliado significativamente a capacidade de monitoramento de estruturas geotécnicas, a implementação de sistemas automatizados ainda enfrenta desafios técnicos, operacionais e organizacionais que limitam sua consolidação em larga escala. A integração entre sensores, protocolos de comunicação, plataformas computacionais e modelos de análise exige arquiteturas robustas e compatíveis com ambientes caracterizados por elevada variabilidade operacional e condições ambientais adversas.

Um dos principais desafios está relacionado à interoperabilidade entre dispositivos e sistemas. Segundo Liu et al. (2025), a integração entre tecnologias digitais, Internet das Coisas, aprendizado de máquina e plataformas de gerenciamento de dados ainda carece de padronização e compatibilidade operacional, dificultando a

implementação de ambientes integrados de monitoramento e análise contínua. Essa limitação torna-se mais evidente em empreendimentos que utilizam equipamentos e softwares de diferentes fabricantes, comprometendo a uniformidade e a integração das informações obtidas.

Além da interoperabilidade, a confiabilidade das redes de sensores representa um fator crítico para o desempenho dos sistemas automatizados. Carri et al. (2021) e Cacciuttolo et al. (2024) destacam que aspectos relacionados ao consumo energético, propagação de sinal, interferências ambientais e falhas de comunicação podem comprometer a continuidade da aquisição de dados, especialmente em estruturas extensas, áreas remotas e ambientes subterrâneos. Nessas condições, a manutenção da estabilidade das redes e da integridade das informações transmitidas torna-se um dos principais desafios operacionais da automação aplicada à geotecnia.

A segurança e a confiabilidade dos dados também constituem aspectos fundamentais nesse processo. Shakhov et al. (2024) ressaltam que sistemas de monitoramento baseados em redes sem fio demandam mecanismos de redundância, correção de falhas e proteção contra perdas de dados para garantir estabilidade operacional e confiabilidade das informações utilizadas nos processos de tomada de decisão. Em estruturas críticas, falhas de transmissão ou inconsistências nos dados podem comprometer significativamente a eficiência de sistemas de alerta e gerenciamento de risco.

Outro desafio importante está associado ao processamento e interpretação dos grandes volumes de dados gerados continuamente pelos sistemas automatizados. Segundo Segalini et

al. (2024), a ampliação da frequência de aquisição desloca parte da complexidade operacional do campo para os ambientes computacionais, exigindo sistemas capazes de realizar validação, filtragem e integração automática das informações. De forma complementar, Cotoarbă et al. (2025) destacam que modelos digitais e sistemas de análise preditiva precisam incorporar mecanismos capazes de lidar com incertezas associadas às medições, aos modelos computacionais e à variabilidade dos materiais geológicos.

Além das limitações técnicas, a automação aplicada à geotecnia também envolve desafios relacionados à gestão operacional e à capacitação das equipes responsáveis pelo monitoramento. França e Duarte (2024) ressaltam que a eficiência dos sistemas automatizados depende da integração entre aquisição de dados, interpretação técnica e processos de tomada de decisão. Nesse sentido, a automação não elimina a necessidade de análise especializada, mas exige profissionais capacitados para interpretar as informações geradas e avaliar o comportamento das estruturas monitoradas.

Nieradka (2016) destaca ainda que sistemas automatizados alcançam melhores resultados quando integrados a rotinas consolidadas de gestão de risco, manutenção e auditoria técnica. A ausência de procedimentos estruturados para validação das informações e resposta operacional pode reduzir significativamente os benefícios associados à automação.

Aspectos econômicos e de manutenção também representam fatores limitantes para expansão dessas tecnologias. Embora sensores sem fio e sistemas remotos reduzam custos relacionados às campanhas de campo, permanecem necessários investimentos

contínuos em calibração instrumental, substituição de equipamentos, atualização tecnológica e manutenção das redes de comunicação. Segundo Soga et al. (2019), o aumento da capacidade de aquisição de dados também amplia a complexidade relacionada ao gerenciamento das informações e à manutenção da infraestrutura tecnológica ao longo do ciclo operacional das estruturas.

Dessa forma, embora a automação represente um avanço significativo para o monitoramento geotécnico contemporâneo, sua implementação ainda depende da superação de desafios relacionados à integração tecnológica, confiabilidade operacional, segurança dos dados, capacitação técnica e sustentabilidade operacional dos sistemas implantados.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica narrativa acerca da automação aplicada ao monitoramento geotécnico no contexto da Indústria 4.0. A pesquisa teve como objetivo reunir e discutir contribuições científicas relacionadas às limitações do monitoramento convencional, às tecnologias emergentes de instrumentação e às arquiteturas inteligentes empregadas na aquisição, transmissão e processamento de dados geotécnicos.

O levantamento bibliográfico foi realizado a partir da consulta a artigos científicos, dissertações, teses, livros e documentos técnicos nacionais e internacionais disponíveis em bases de dados acadêmicas e repositórios científicos. Foram priorizados estudos relacionados à instrumentação geotécnica, sistemas automatizados

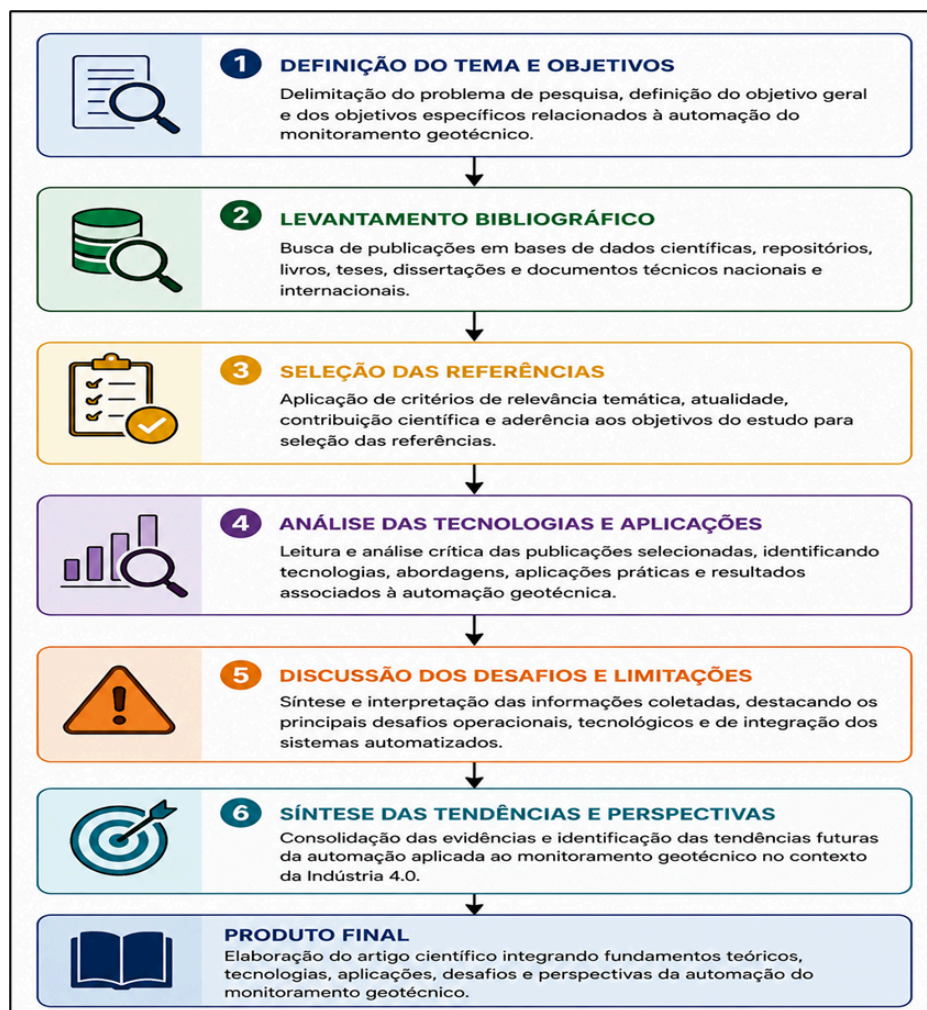
de monitoramento, Internet das Coisas, sensores inteligentes, protocolos de comunicação, Digital Twin e tecnologias voltadas à gestão e segurança de estruturas geotécnicas.

A seleção das referências considerou critérios de relevância temática, aderência ao objetivo proposto e contribuição técnica para discussão das potencialidades, aplicações e limitações da automação aplicada à engenharia geotécnica. Além de publicações recentes voltadas às tecnologias emergentes, também foram utilizados trabalhos clássicos relacionados aos fundamentos da instrumentação e do monitoramento geotécnico.

Após a etapa de levantamento e seleção bibliográfica, os estudos foram organizados e analisados de forma descritiva e interpretativa, permitindo identificar tendências tecnológicas, aplicações práticas, desafios operacionais e perspectivas associadas à transformação digital dos sistemas de monitoramento geotécnico.

A Figura 02 apresenta, de forma resumida, as etapas adotadas para desenvolvimento da pesquisa bibliográfica e organização das discussões realizadas neste trabalho.

Figura 02 – Fluxograma das etapas adotadas para o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Próprio autor (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução das tecnologias digitais aplicadas à engenharia geotécnica evidencia uma mudança significativa na forma como estruturas de terra vêm sendo monitoradas nas últimas décadas. A substituição gradual de campanhas periódicas de leitura manual por sistemas automatizados de aquisição contínua de dados representa uma transformação operacional diretamente associada aos avanços da Indústria 4.0 e à crescente demanda por maior segurança, confiabilidade e capacidade preditiva nos processos de monitoramento.

Os estudos analisados demonstram que os métodos convencionais ainda permanecem amplamente utilizados em diferentes aplicações geotécnicas, principalmente devido à simplicidade

operacional e ao menor custo inicial de implantação. Entretanto, autores como França e Honório (2024), Brassington (2017) e Cardoso (2025) ressaltam que a baixa frequência das leituras, a dependência de operações presenciais e a dificuldade de obtenção de dados em tempo oportuno limitam significativamente a capacidade de resposta diante de cenários críticos.

Nesse contexto, observa-se que a automação aplicada ao monitoramento geotécnico surge como alternativa capaz de ampliar a continuidade operacional e reduzir vulnerabilidades associadas às campanhas manuais. Estudos desenvolvidos por Abraham et al. (2020), Piciullo et al. (2022) e Werthmann et al. (2024) demonstram que a integração entre sensores inteligentes, redes de comunicação e sistemas automatizados de alerta permite maior frequência de aquisição de dados, melhoria na rastreabilidade das variáveis monitoradas e maior eficiência na identificação de comportamentos associados a possíveis situações de instabilidade.

Além da ampliação da capacidade operacional, a integração entre plataformas digitais, protocolos de comunicação e sistemas de armazenamento também modifica a forma como as informações geotécnicas são processadas e interpretadas. Tecnologias como MQTT, Node-RED e TimescaleDB possibilitam estruturar arquiteturas integradas capazes de realizar aquisição, transmissão, organização e armazenamento contínuo dos dados provenientes dos sensores instalados em campo. Essa integração favorece não apenas o monitoramento remoto, mas também a implementação de sistemas de análise preditiva e suporte automatizado à tomada de decisão.

Outro aspecto relevante identificado na literatura refere-se ao crescimento do uso de tecnologias complementares, como Digital Twin, sensores IoT, drones, imagens InSAR e plataformas WebGIS. Essas ferramentas ampliam a capacidade de monitoramento espacial e temporal das estruturas geotécnicas, permitindo maior detalhamento das análises e melhor compreensão do comportamento hidromecânico dos maciços monitorados. Nesse cenário, o monitoramento deixa de assumir caráter predominantemente reativo e passa a incorporar estratégias preventivas e preditivas voltadas à gestão de risco.

Entretanto, embora os avanços tecnológicos sejam significativos, os estudos analisados também evidenciam que a consolidação da automação aplicada à geotecnia ainda enfrenta limitações importantes. Problemas relacionados à interoperabilidade entre sistemas, confiabilidade das redes de sensores, segurança dos dados, manutenção dos equipamentos e gerenciamento de grandes volumes de informações permanecem como desafios recorrentes para implementação de arquiteturas automatizadas em larga escala.

Além disso, observa-se que a automação não elimina a necessidade de interpretação técnica especializada. Conforme discutido por França e Duarte (2024) e Nieradka (2016), a eficiência dos sistemas automatizados depende diretamente da integração entre aquisição de dados, análise técnica e tomada de decisão operacional. Dessa forma, o uso de tecnologias inteligentes deve ser compreendido como ferramenta de suporte à engenharia geotécnica, e não como substituição da avaliação técnica realizada pelos profissionais responsáveis pelo monitoramento.

O quadro 01 apresenta uma síntese comparativa entre características associadas ao monitoramento convencional e aos sistemas automatizados aplicados à engenharia geotécnica.

Quadro 01 – Síntese comparativa entre características associadas ao monitoramento convencional e aos sistemas automatizados aplicados à engenharia geotécnica

Aspecto analisado	Monitoramento convencional	Monitoramento automatizado	Impacto operacional
Aquisição de dados	Manual e periódica	Contínua e remota	Maior frequência de monitoramento
Resposta a eventos críticos	Dependente de inspeção presencial	Alertas em tempo real	Redução do tempo de resposta
Integração das informações	Limitada	Centralizada e integrada	Melhor suporte à decisão
Armazenamento de dados	Local e fragmentado	Digital e automatizado	Maior rastreabilidade histórica
Gestão de risco	Predominantemente reativa	Preventiva e preditiva	Ampliação da segurança operacional
Dependência operacional	Elevada atuação em campo	Monitoramento remoto	Redução de vulnerabilidades operacionais

Fonte: Próprio autor (2026).

De modo geral, os estudos analisados indicam que a automação representa uma tendência crescente no monitoramento geotécnico contemporâneo, especialmente em estruturas críticas que demandam acompanhamento contínuo e elevada confiabilidade operacional. Contudo, sua consolidação depende não apenas do avanço tecnológico, mas também do desenvolvimento de arquiteturas interoperáveis, protocolos seguros de comunicação, estratégias eficientes de gerenciamento de dados e capacitação técnica das equipes envolvidas nos processos de monitoramento e análise geotécnica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento geotécnico desempenha papel fundamental na avaliação da estabilidade e da segurança de estruturas de terra, especialmente em obras sujeitas a variações hidráulicas e geomecânicas contínuas. A partir da revisão bibliográfica realizada, observou-se que os métodos convencionais de monitoramento, embora amplamente utilizados, apresentam limitações relacionadas à baixa frequência de aquisição de dados, dependência de operações presenciais e dificuldade de resposta em situações críticas.

Nesse contexto, a automação aplicada à geotecnia vem se consolidando como uma alternativa capaz de ampliar a continuidade operacional, aumentar a confiabilidade das informações e fortalecer estratégias de prevenção e gestão de risco. A incorporação de sensores inteligentes, redes IoT, plataformas digitais, protocolos de comunicação e sistemas automatizados de análise permite a implementação de arquiteturas integradas de monitoramento contínuo, favorecendo maior eficiência na

identificação de alterações no comportamento das estruturas geotécnicas.

Os estudos analisados demonstram que tecnologias associadas à Indústria 4.0 vêm promovendo uma transformação significativa nos processos de instrumentação geotécnica, substituindo gradualmente modelos baseados em campanhas episódicas por sistemas conectados e automatizados. Além da ampliação da capacidade de aquisição de dados, essas soluções possibilitam integração entre monitoramento, armazenamento, processamento e interpretação das informações em tempo real.

Entretanto, a revisão também evidenciou que a consolidação da automação aplicada ao monitoramento geotécnico ainda depende da superação de desafios relacionados à interoperabilidade entre sistemas, segurança e confiabilidade dos dados, manutenção das redes de sensores, custos operacionais e gerenciamento de grandes volumes de informações. Além disso, a eficiência desses sistemas continua diretamente associada à interpretação técnica especializada e à adequada integração entre tecnologia e gestão operacional.

Dessa forma, conclui-se que a automação representa uma tendência crescente e estratégica para modernização do monitoramento geotécnico contemporâneo, contribuindo para ampliação da segurança operacional, melhoria da capacidade preditiva e fortalecimento das práticas de gestão de risco. Por fim, recomenda-se que estudos futuros aprofundem o desenvolvimento de arquiteturas interoperáveis, modelos inteligentes de análise e estratégias de integração entre tecnologias digitais e

instrumentação geotécnica aplicada a diferentes contextos operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, Minu Treesa; SATYAM, Neelima; PRADHAN, Biswajeet; ALAMRI, Abdullah M. *IoT-based geotechnical monitoring of unstable slopes for landslide early warning in the Darjeeling Himalayas*. **Sensors**, v. 20, n. 9, p. 2611, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2611>. Acesso em: 10 jul. 2025.

AKANBI, A. *Towards a microservice-based middleware for a multi-hazard early warning system*. **arXiv**, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2312.15323>.

BATISTA, Heuder Pascele. *Desenvolvimento de diretrizes para monitoramento geotécnico e plano de contingência/emergência em aterros sanitários*. 2010. 148 f. **Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/FRPC-8DQH33/1/2014_05_04_dissertacao_heuder.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

BRASSINGTON, Rick. *Field Hydrogeology*. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2017. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Field_Hydrogeology.html?id=nR9IDgAAQBAJ. Acesso em: 10 jul. 2025.

CACCIUTTOLO, C.; ATENCIO, E.; KOMARIZADEHASL, S.; LOZANO-GALANT, J. A. *Internet of Things Long-Range-Wide-Area-Network-Based Wireless Sensors Network for Underground Mine Monitoring*:

Planning an Efficient, Safe, and Sustainable Labor Environment. Sensors, v. 24, n. 21, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/21/6971>

CALABREZ, Gustavo Tadeu Miranda. Implementação de uma arquitetura IOT com a ferramenta Node-RED. 2019. 51 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

CARDOSO, João Pedro Milagres. *Centros de monitoramento geotécnico em barragens de rejeito: revisão das abordagens manuais e automatizadas*. Universidade Federal de Ouro Preto, 2025. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/7712>.

CARMO, Thiago Koppe do. *Avaliação de monitoramento geotécnico do aterro sanitário de Brasília*. 2021. **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)** – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/32453>. Acesso em: 25 out. 2025.

CARRI, A.; VALLETTA, A.; CAVALCA, E.; SAVI, R.; SEGALINI, A. *Advantages of IoT-based geotechnical monitoring systems integrating automatic procedures for data acquisition and elaboration. Sensors (Basel)*, v. 21, n. 6, 2249, 2021. DOI: 10.3390/s21062249. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/2249>

COTOARBĂ, D.; STRAUB, D.; SMITH, I. F. C. *Probabilistic digital twins for geotechnical design and construction. Data-Centric Engineering*, v. 6, e30, 2025. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/data-centric->

engineering/article/probabilistic-digital-twins-for-geotechnical-design-and-construction/FAC8A47F195489473185C2EC9DF5CC3C.

FRANÇA, T. R. S.; DUARTE, J. P. *Instrumentação Geotécnica em Estruturas de Disposição de Rejeitos: Aplicações e Relevância*. **Anais do COBRAMSEG** 2024. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/546. Disponível em: <https://editora.editoraomnisscientia.com.br/artigoPDF/24203124265.pdf>.

FRANÇA, Thainá Rainho do Sacramento; HONÓRIO, Clarissa. *Revisão bibliográfica sobre instrumentação geotécnica em barragens: vantagens e desvantagens da automação*. 2024. Disponível em: https://www.scipedia.com/wd/images/5/50/Draft_Honorio_769295961-1324-document.pdf

GERMAINE, John T.; GERMAINE, Amy V. *Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers*. Chichester: John Wiley & Sons, 2009.

GIORGINI, M. G. *Avaliação do desempenho geotécnico e ambiental de aterros sanitários por meio de modelagem numérica e análise de dados de monitoramento*. 2019. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica)** – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/33652>. Acesso em: 8 jul. 2025.

GUPCHUP, J.; SHARMA, A.; TERZIS, A.; BURNS, R.; SZALAY, A. *The Perils of Detecting Measurement Faults in Environmental Monitoring Networks*. **arXiv**, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1902.03492>

HUSSEIN, Firas Ahmed; YASEEN, Mohammad Tariq; MUSTAFA, Mohammed Obaid. *The Future of Intelligent Industrial Systems: PLC, Node-RED, and IoT/IIoT*. AUIQ Technical Engineering Science, v. 2, n. 2, p. 1-15, 2025. DOI: 10.70645/3078-3437.1034

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0*. Munich: National Academy of Science and Engineering (ACATECH), 2013. Disponível em:

https://ia801901.us.archive.org/35/items/FinalReportRecommendationOnStrategicInitiativeIndustrie4.0/Final%20Report_%20Recommendation%20on%20strategic%20initiative%20Industrie_4.0.pdf

LIU, X.; ANTWI-AFARI, M. F.; LI, J.; ZHANG, Y.; MANUD, P. *BIM, IoT, and GIS integration in construction resource monitoring: a systematic review*. **Automation in Construction**, v. 174, 2025. Disponível em:

https://publications.aston.ac.uk/id/eprint/47398/1/X_Liu_et_al_BIM_IoT_and_GIS_integration_in_construction_resource_monitoring.pdf.

LOSIER, L. M.; ALMEIDA, M.; DORS, C.; GARCHET, P. M.; FAGUNDES, D.; ROZA, F. *Geodesição – Solução tecnológica para o monitoramento geotécnico: Estudo de caso – Pilhas de minério sobre solos moles*. 2012. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/281784427>

MACEDO, H. R. *Automação de processo de obtenção de biodiesel em plantas de pequeno porte, utilizando controlador lógico programável*. 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Tocantins. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11612/1917>

MARTINVIITA, M. *Aikasarjati tokanta teollisuuden esineiden internetissä*. 2018. **Tese de Doutorado**. Universidade de Oulu.

Disponível

em:

<https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/10867/nbnfioulu-201811093007.pdf>

MEDINA-PÉREZ, M.; RODRÍGUEZ-DONCEL, V.; VELA, R.; RAMÍREZ-GONZÁLEZ, G.; DÍAZ-GONZÁLEZ, L. *Environmental monitoring using MQTT and Node-RED in IoT systems. Universidade da Ilha de Gran Canaria*, 2021. Disponível em:

<https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/113781>

MOSTAFA, J.; WEHBI, S.; CHILINGARYAN, S.; KOPMANN, A. *SciTS: A Benchmark for Time-Series Databases in Scientific Experiments and Industrial Internet of Things*. **arXiv**, 2022. Disponível em:

<https://arxiv.org/abs/2204.09795>

NIERADKA, I. P. *Sistema de monitoramento da instrumentação de segurança: um estudo de caso considerando a Usina de Itaipu*.

Dissertação (Mestrado), UNIOESTE, 2016. Disponível em:

https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/1037/1/Itamar_Nieradka_2016.pdf.

OTTO, A.; AGATZ, N.; CAMPBELL, J.; GOLDEN, B.; PESCH, E. *Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey*. **Networks**, v. 72, n. 4, p. 411–458, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/net.21818>

PATEL, K. K.; PATEL, S. M. *Internet of Things (IoT): Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges*. **International Journal of Engineering Science and Computing**, v. 6, n. 5, p. 6122–6131, 2016. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/330425585>

PICIULLO, Luca; CAPOBIANCO, Vittoria; HEYERDAHL, Håkon. *A first step towards a IoT-based local early warning system for an unsaturated slope in Norway*. **Natural Hazards**, v. 114, p. 3377–3407, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-022-05524-3>

SEGALINI, A.; VALLETTA, A.; CONCIATORI, M.; CARRI, A. *Improving Geotechnical Monitoring System Performances by Integrating Advanced Technologies for Data Acquisition and Elaboration*. 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/.../Improving-Geotechnical-Monitoring-System-Performances-by-Integrating-Advanced-Technologies-for-Data-Acquisition-and-Elaboration.pdf>.

SHAKHOV, V. V.; MIGOV, D. A.; CHEN, H.; MISCHENKO, P. V.; KOO, I. *Toward Reliability of Long Wireless Sensor Networks*. **IEEE Access**, v. 12, 2024. Disponível em: <https://doaj.org/article/fe147cced3154adaa61bb84bffb86296>.

SOGA, K.; EWAIS, A.; FERN, J.; PARK, J. *Advances in Geotechnical Sensors and Monitoring*. In: LU, N.; MITCHELL, J. K. (eds.). *Geotechnical Fundamentals for Addressing New World Challenges*. **Springer**, 2019. Disponível em: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-06249-1_2.

SOSA, R.; KIRALY, C.; PARRA-RODRÍGUEZ, J. D. *Offloading Execution from Edge to Cloud: a Dynamic Node-RED Based Approach*. arXiv, 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1810.11287>

STRUCKOV, Alexey; YUFA, Semen; VISHERATIN, Alexander A.; NASONOV, Denis. *Evaluation of modern tools and techniques for storing time-series data*. **Procedia Computer Science**, v. 156, p. 282–291, 2019. DOI: 10.1016/j.procs.2019.08.212.

TAN, W.; WU, S.; LI, Y.; GUO, Q. *Digital Twins' Application for Geotechnical Engineering: A Review of Current Status and Future Directions in China*. **Applied Sciences**, v. 15, n. 15, 8229, 2025. DOI: 10.3390/app15158229. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/15/8229>

TORRES, A. C.; RAMÍREZ, J. L.; FÓRNES, P. *Uso de imágenes satelitales InSAR y monitoreo automatizado con sistema Geomos para optimizar el monitoreo geotécnico: Caso Mina Utunsa – Apurímac – Perú*, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/356291104>

WANG, Y.; REZAEI, A.; HICKS, S. *Digital twin applications in geotechnical engineering: A systematic review*. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2025. Disponível em: <https://wrap.warwick.ac.uk/id/eprint/193216/>

WERTHMANN, Christian; SAPENA, Marta; KÜHNEL, Marlene; SINGER, John; GARCIA, Carolina; BREUNINGER, Tamara; GAMPERL, Moritz; MENSCHIK, Bettina; SCHÄFER, Heike; SCHRÖCK, Sebastian; SEILER, Lisa; THURO, Kuroschi; TAUBENBÖCK, Hannes. *Insights into the development of a landslide early warning system prototype in an informal settlement: the case of Bello Oriente in Medellín, Colombia*. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 24, n. 6, p. 1843–1870, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1843-2024>

¹ Engenheiro Civil, Mestrando pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental - PEBGA, Universidade Federal do Pará. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Engenheira Civil, Mestranda pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Infraestruturas e Desenvolvimento Energético – PPGINDE, Universidade federal do Pará. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Engenheiro Civil, Especialista em Engenharia de Produção, Universidade da Amazônia. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Docente, Doutor em Estruturas, no Instituto de Tecnologia – ITEC da Universidade Federal do Pará. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)