

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE MESTRADO EM
CIDADES INTELIGENTES E SUSTENTÁVEIS**

ANDERSON BEZERRA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO IoT PARA MONITORAMENTO DA
INCLINAÇÃO DE CONTENÇÃO EM GABIÃO CAIXA: UM EXEMPLO DE
ENGENHARIA 4.0**

São Paulo

2023

Anderson Bezerra da Silva

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO IoT PARA MONITORAMENTO DA
INCLINAÇÃO DE CONTENÇÃO EM GABIÃO CAIXA: UM EXEMPLO DE
ENGENHARIA 4.0**

**DEVELOPMENT OF AN IoT DEVICE FOR MONITORING THE INCLINATION OF
CONTAINMENT IN BOX GABION: AN EXAMPLE OF ENGINEERING 4.0**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis**

Orientador: Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho

São Paulo

2023

Silva, Anderson Bezerra da.

Desenvolvimento de dispositivo IoT para monitoramento da inclinação de contenção em gabião caixa: um exemplo de engenharia 4.0. / Anderson Bezerra da Silva. 2023.

76 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2023.

Orientador (a): Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho.

1. Muro de contenção. 2. Internet das coisas. 3. Monitoramento de integridade estrutural. 4. Nuvem.

I. Paschoalin Filho, João Alexandre.

II. Título.

CDU 711.4

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO IOT PARA MONITORAMENTO DA
INCLINAÇÃO DE CONTENÇÃO EM GABIÃO CAIXA: UM EXEMPLO DE
ENGENHARIA 4.0**

Por

Anderson Bezerra da Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, sendo a banca examinadora formada por:

Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho - Universidade Nove de Julho - UNINOVE

Prof. Dr. Wilson Levy Braga da Silva Neto - Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof. Dr. António Guerner Dias - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

São Paulo, 23 de fevereiro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente ao Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho, que se envolveu completamente no tema da pesquisa, esclarecendo todas as minhas dúvidas, realizando contatos com pessoas, com empresas, abrindo portas para que pudéssemos testar nosso equipamento em campo, esforçando-se de tal forma durante a execução desse trabalho, que posso afirmar com total certeza, que sem a sua a sua contribuição esse trabalho não teria sido concluído.

Agradeço a Grafcet Automação Industrial, por permitir que eu utilizasse o servidor em nuvem da empresa e a infraestrutura do escritório para montagem e testes do protótipo.

Agradeço ao Sérgio Bernardo Risardi, Luiz Kokumai, João Camilo e Victor Coronado, por me ajudarem quando os códigos não faziam mais sentido.

Agradeço a minha esposa Lucilene e ao meu filho Diego Bezerra, por estarem ao meu lado quando precisamos nos deslocar até a obra para realizar trocas de baterias, aos finais de semana.

RESUMO

As estruturas de contenção são utilizadas para promover a estabilização de maciços de solo, rochas ou mistos, a fim de conter os movimentos de massas que podem gerar deslizamentos, provocando danos ambientais, materiais e em alguns casos ferir pessoas. Essas estruturas, consistem em um importante elemento da infraestrutura urbana e são obras que necessitam de segurança e durabilidade. Devido a sua importância, as contenções devem ser periodicamente inspecionadas para que se possa garantir que suas condições estruturais e as características do maciço contido estejam compatíveis com os parâmetros previstos no projeto. Com o avanço da tecnologia, estão disponíveis novos recursos para coleta e análise de estruturas, tanto para verificar sua condição atual, quanto para prever suas condições futuras. No presente trabalho, foi desenvolvido, utilizado e avaliado um dispositivo eletrônico para o acompanhamento e mensuração da inclinação de uma estrutura de contenção de margem, executada em gabiões tipo caixa. A contenção monitorada foi implantada no bairro de São Mateus, zona leste da cidade de São Paulo. O equipamento responsável pelo monitoramento foi um dispositivo IoT (Internet of Things), que coletou as informações provenientes de um sensor de aceleração e as enviou por meio da internet para um servidor em nuvem. Uma vez no servidor em nuvem, esses dados foram armazenados em banco de dados permitindo o acesso ao histórico da variação da inclinação. As leituras coletadas pelo equipamento foram exportadas, via IoT, para uma planilha eletrônica, o que possibilitou correlacionar suas variações às fases executivas da contenção. Adicionalmente foram realizadas análises estatísticas, para verificar se as variações capturadas pelo sensor consistiam ou não, em um possível desaprumo da contenção. A realização de um número significativo de leituras, o acompanhamento da variação dessas leituras por meio de uma interface de simples acesso, o armazenamento em banco de dados e a possibilidade de exportação desses dados para realização de análises estatísticas e relatórios customizados, estão entre os principais benefícios da utilização do dispositivo IoT para o monitoramento realizado.

Palavras-chaves: Muro de Contenção; Internet das Coisas; Monitoramento de Integridade Estrutural; Nuvem.

Abstract

Containment structures are used to promote the stabilization of soil, rock or mixed masses, in order to contain mass movements that can generate landslides, causing environmental and material damage and in some cases injuring people. These structures are an important element of urban infrastructure and are works that require safety and durability. Due to their importance, containments must be periodically inspected to ensure that their structural conditions and the characteristics of the contained massif are compatible with the parameters foreseen in the project. With the advancement of technology, new resources are available for collecting and analyzing structures, both to verify their current condition and to predict their future conditions. In the present work, an electronic device was developed, used and evaluated for monitoring and measuring the inclination of a bank containment structure, executed in box-type gabions. The monitored containment was implemented in the neighborhood of São Mateus, east zone of the city of São Paulo. The equipment responsible for monitoring was an IoT (Internet of Things) device, which collected information from an acceleration sensor and sent it over the internet to a cloud server. Once on the cloud server, these data were stored in a database allowing access to the history of the slope variation. The readings collected by the equipment were exported, via IoT, to an electronic spreadsheet, which made it possible to correlate their variations to the executive phases of containment. Additionally, statistical analyzes were carried out to verify whether the variations captured by the sensor consisted or not of a possible failure of the containment. Carrying out a significant number of readings, monitoring the variation of these readings through a simple access interface, storing them in a database and the possibility of exporting these data to carry out statistical analyzes and customized reports, are among the main benefits of using the IoT device for the monitoring performed.

Keywords: Retaining Wall; Internet of Things; Structural Health Monitoring; Cloud.

Sumário

1 Introdução e justificativa	14
1.1 Objetivo da pesquisa	16
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	16
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	16
2 Referencial Teórico	17
2.1 Movimento de massa	17
2.2 Fatores de segurança de estabilidade de taludes	18
2.3 Estruturas de Contenção	20
2.3.1 Estruturas de Contenção em Gabiões	20
2.4 Monitoramento de Integridade Estrutural	25
2.4.1 Sensores utilizados para monitoramento de estruturas	26
2.4.2 Instrumentações para monitoramento de estruturas de contenção	28
2.5 Sensores de aceleração do tipo MEMS (<i>Micro EletroMechanical Systems</i>)	33
2.6 Internet das Coisas (IoT)	34
2.6.1 Tecnologias wireless para transmissão de dados	37
2.7 Computação em nuvem	38
2.8 Engenharia civil 4.0	39
3 Metodologia	41
3.1 Componentes utilizados no equipamento	41
3.1.1 Sensor MPU6050	41
3.1.2 Placa de desenvolvimento TTGO T-Call ESP32	43
3.1.3 Montagem do dispositivo IoT	44
3.2 Desenvolvimento do código fonte do TTGO T-Call ESP32	45
3.2.1 Código fonte do dispositivo IoT	45
3.3 Desenvolvimento da interface web e do banco de dados	47
3.4 Caracterização da obra monitorada e instalação do dispositivo	56

4 Resultados e discussões	62
5 Conclusões	68
Referências.....	70

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Classificação de suscetibilidade de deslizamentos por estado.....	18
Figura 2. Elementos do gabião tipo caixa	21
Figura 3. Estrutura de contenção feita com gabião	21
Figura 4. Verificações de estabilidade em muros de contenção de gabião	22
Figura 5. Elementos do gabião tipo saco.....	23
Figura 6. Elementos do gabião tipo colchão	24
Figura 7. Integração da vegetação local na contenção de gabião caixa.	24
Figura 8. Execução da obra no córrego Macambira.....	25
Figura 9. Princípio do funcionamento de um sensor.....	26
Figura 10. Sensores instalados na ponte Tsing Ma – Hong Kong	27
Figura 11. Coleta de dados da vibração de uma ponte ferroviária – (A) Acelerômetro instalado no tabuleiro; (B) – Datalogger conectado ao computador; (C) Forma modal resultante	28
Figura 12. Inclinômetro instalado em campo.....	30
Figura 13. Deslocamento horizontal em função da profundidade da escavação.: A) Deslocamentos medidos pelo inclinômetro 1; B) Deslocamentos medidos pelo inclinômetro 2; C) Deslocamentos medidos pelo inclinômetro 3; D) Deslocamentos medidos pelo inclinômetro 4.....	30
Figura 14. Dano em tubulação utilizada pelo inclinômetro.	31
Figura 15. Piezômetro Casagrande instalado na barragem de terra da PCHo.	32
Figura 16. Leituras dos piezômetros da barragem da PCH durante o período de monitoramento – (A) Leituras piezômetro PC-201; (B) Leituras piezômetro PC-202; (C) Leituras piezômetro PC-203; (D) Leituras piezômetro PC-204;	32
Figura 17. Sensor ultrassônico MEMS da TDK	33
Figura 18. Esquemático do acelerômetro e capacitância diferencial	34
Figura 19. Componentes de um dispositivo IoT	35
Figura 20. (A) Dispositivo IoT desenvolvido escala em centímetros; (B) Dashboards gerados na Nuvem IBM	39
Figura 21. Coleta IoT InZoneAlert	40
Figura 22. (A) Placa MPU6050; (B)pinagem do chip; (C) orientação dos eixos dos sensores.	42
Figura 23. Blocos internos do chip MPU6050.....	42
Figura 24. Placa de desenvolvimento TTGO T-Call e funções dos pinos	43
Figura 25. Conexão entre TTGO T-Call e MPU6050.....	43
Figura 26. Etapas da montagem do sensor e da placa TTGO T-Call - (A) Sensor MPU6050 e bateria reserva fixados na caixa de junção; (B) Placa de desenvolvimento TTGO T-Call; (C) Placa de	

desenvolvimento, sensor, bateria e antena acondicionados na caixa; (D) Caixa de junção fechada com antena do modem fixada na parte frontal; (E) Carregador portátil para alimentação principal; (F) Caixa de passagem hermética IP65; (G) Dispositivo IoT , carregador portátil montados na caixa hermética; (H) Testes do dispositivo IoT em bancada.	45
Figura 27. Software Arduino IDE.....	45
Figura 28. Funções de cálculo dos ângulos dos eixos do sensor.....	46
Figura 29. Fluxograma da lógica desenvolvida para o TTGO T-Call.....	47
Figura 30. Tela de login para a interface de desenvolvimento do Node-RED.....	48
Figura 31. Flow desenvolvido no Node-RED.....	48
Figura 32. Configuração nó aedes broker.....	49
Figura 33. Criação dos tópicos MQTT feita no Arduino IDE.....	49
Figura 34. Criação do tópico MQTT no Node-RED.....	50
Figura 35. Flow das telas de visualização dos dados recebidos no Node-RED.....	50
Figura 36. Tela de visualização dos valores do acelerômetro recebidos pelo Node-RED.....	51
Figura 37. Tela de visualização dos valores do giroscópio recebidos pelo Node-RED.....	51
Figura 38. Flow das telas de visualização dos ângulos calculados pelo TTGO T-Call.....	52
Figura 39. Tela de visualização ângulos recebidos no Node-RED.....	52
Figura 40. Configuração da conexão ao banco de dados.....	53
Figura 41. Banco de dados criado e visualização da tabela com o histórico dos dados.....	53
Figura 42. Configuração do nó mysql para gravação no banco de dados.....	54
Figura 43. Flow responsável pela extração dos valores armazenados no banco de dados.....	54
Figura 44. Consulta ao banco de dados feita pela interface web.....	55
Figura 45. Local de colapso e rachaduras no pavimento devido a movimentação do solo.....	56
Figura 46. Vista geral do local e contenção provisória.....	57
Figura 47. Detalhe do degrau hidráulico em frente ao local rompido.....	57
Figura 48. Galeria de águas pluviais situada em frente ao local rompido.....	58
Figura 49. Vista superior da implantação da contenção provisória e da contenção de gabião.....	58
Figura 50. Seção típica da solução projetada.....	59
Figura 51. Componentes do dispositivo IoT dentro da caixa de proteção.....	59
Figura 52. Execução da amarração das gaiolas.....	60
Figura 53. Posicionamento da placa de MDF entre a malha e as pedras.....	60
Figura 54. Dispositivo IoT instalado na contenção.....	61
Figura 55. Histórico da variação da inclinação visualizado através da interface web.....	62
Figura 56. Histórico da inclinação visualizado em planilha eletrônica.....	63

Figura 57. Vista em corte da contenção e variação da inclinação média durante o período de monitoramento (sem escala).....	64
Figura 58. Histórico da variação da inclinação do eixo X	65
Figura 59. Histórico da variação da inclinação do eixo Z.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Terminologias adequadas para os tipos de movimento de massa	17
Tabela 2 - Nível de segurança contra perda de vidas humanas	19
Tabela 3 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais	19
Tabela 4 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos	19
Tabela 5 - Tipos de sensores e aplicações de medição	26
Tabela 6 - Instrumentações e técnicas para medição.....	29
Tabela 7 - Principais tecnologias de redes wireless	37
Tabela 8 - Quantitativo e preços dos principais componentes do IoT.....	44
Tabela 9 - Análise estatística das leituras obtidas	64
Tabela 10 - Análise estatística das leituras médias obtidas por meio de teste T	65
Tabela 11 – Posição de montagem eixo Y– Valores Obtidos	66
Tabela 12 – Posição de montagem eixo X – Valores Obtidos	67
Tabela 13 – Posição de montagem ângulo Z– Valores Obtidos.....	67

1 Introdução e justificativa

Não é raro ser noticiado que famílias inteiras que viviam em moradias irregulares, localizadas em áreas com risco de deslizamento de terra, tiveram suas casas soterradas com morte entre os que ali habitavam. Assim como também é frequentemente noticiado que rodovias tiveram o seu tráfego interrompido devido a deslizamentos de maciços de solo ou rocha.

A movimentação de um maciço, pode ocorrer por fatores naturais, como a mudança das características de resistência do solo devido a quantidade de água precipitada durante um período de chuva intenso ou por processos antrópicos, como corte, aterro e compactação de um terreno (Britto & Fiori, 2021).

As estruturas de contenção ou muros de arrimo, são estruturas utilizadas para assegurar a estabilidade de um talude e promover o reforço da resistência de maciços, evitando assim uma movimentação de massa que poderia vir a gerar deslizamentos, tombamentos, escorregamentos e desprendimento de fragmentos.

O arrimo em gabião caixa é um tipo de contenção que utiliza seu próprio peso para opor-se ao empuxo exercido pelo maciço que é contido (Petrúcio, 2018). Estes são compostos por gaiolas metálicas, que são preenchidas com enrocamento e cuja amarração garante a criação de uma estrutura monolítica, homogênea, resistente e permeável, capaz de conter maciços, tal como comentado por Barros et al. (2017).

Após construídas, as estruturas de contenção necessitam ser inspecionadas a fim de garantir que estas se encontrem sob as condições previstas no projeto e, caso não estejam, que medidas sejam tomadas para seu reforço ou manutenção. Todavia, muitas vezes os locais que devem ser inspecionados são de difícil acesso e perigosos (Araújo, 2017).

Existem instrumentos que permitem a realização do acompanhamento do comportamento de estruturas, entretanto esses equipamentos geralmente são robustos e os testes são influenciados ou até mesmo interrompidos em função das condições climáticas ou experiência dos operadores; o que pode causar dúvidas nos parâmetros coletados.

Ainda que técnicos munidos de instrumentos se desloquem até uma estrutura para analisá-la, o intervalo entre inspeções pode ser grande o suficiente para que aconteça a evolução de uma possível patologia, como também o método de registro da vistoria não permita correlacionar fatores que ajudariam a fazer um diagnóstico mais preciso e antecipado das condições da integridade estrutural da contenção.

A estratégia de um sistema capaz de monitorar continuamente as condições da integridade de uma estrutura é chamada *Structural Health Monitoring* (SHM). Por meio do

SHM é possível verificar não só as condições atuais, como também acompanhar a evolução de danos e, em muitos casos, prever o desempenho futuro das obras monitoradas, uma vez que o acompanhamento é conduzido de forma contínua (Farrar et al. 2009).

O monitoramento de estruturas de contenção pode ser beneficiado com o avanço tecnológico intrínseco ao que é chamado pelo meio técnico de “quarta revolução industrial” ou “engenharia 4.0”, fomentada entre outros aspectos pela conectividade dos mais diversos tipos de sistemas, equipamentos, máquinas e sensores que permitem a disponibilização de informações em tempo real através da internet (Schwab, 2016).

A Internet das Coisas (do inglês Internet of Things) é uma divisão da tecnologia da informação, resultado de um desenvolvimento contínuo, em especial no que se refere a miniaturização de dispositivos eletrônicos e à criação de novos protocolos de comunicação.

A IoT permite que coisas, tais como objetos pessoais, máquinas, sensores, possam ser conectados à internet disponibilizando informações sobre si, comunicando-se com outros dispositivos inteligentes (Filho, 2014).

Como em qualquer segmento, a avaliação das condições dos elementos da infraestrutura de uma cidade acompanha as tendências de mercado e índices econômicos. Sendo assim, existe sempre a necessidade de encontrar métodos para melhorias e, entre esses métodos, a utilização da tecnologia tem um papel de destaque.

Ferramentas tecnológicas podem ser importantes aliadas no direcionamento de ações para conservação da infraestrutura de uma cidade, uma vez que as estruturas de contenção têm um papel fundamental no que se refere a segurança dos cidadãos e proteção ambiental.

Tendo conhecimento, e o intuito de se adequar ao avanço tecnológico, decidiu-se nessa pesquisa pelo desenvolvimento e utilização de um sistema IoT, que conduziu o monitoramento da inclinação de uma estrutura de contenção de um trecho da margem do Córrego dos Machados, situado na Zona Leste de São Paulo, registrando todas as leituras referentes ao comportamento da obra de forma contínua em um servidor na nuvem, disponibilizando em tempo real dashboards e relatórios gráficos que poderão ser acessados a partir de qualquer dispositivo que possua um navegador web.

1.1 Objetivo da pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo baseado em tecnologia IoT para monitoramento do comportamento de uma estrutura de contenção executada em gabião caixa.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Criar uma interface gráfica para visualização da variação da inclinação que seja acessada através de uma plataforma móvel.
- Avaliar os resultados a partir da coleta de dados, de tal forma que seja possível correlacionar a variação da inclinação com as atividades de execução da estrutura.

2 Referencial Teórico

2.1 Movimento de massa

O termo movimento de massa, refere-se ao deslocamento de um determinado volume de maciço de solo ou de rocha orientado por meio de uma superfície de ruptura característica. Esses movimentos de massa, podem ser classificados principalmente como queda, rolamento, tombamento e escorregamento (ABNT NBR 11.682, 2009).

A principal causa para a movimentação de um maciço é a redução da capacidade de resistir a tensões atuantes no solo, que sejam superiores à sua resistência de cisalhamento na região da cunha de deslizamento. A diminuição da resistência de um maciço pode acontecer naturalmente, causada por processos intempéricos, como também pode ocorrer em decorrência da intervenção humana em terrenos, devido a atividades construtivas como realização de cortes, aterros, construção de córregos, entre outras (Pinto, 2020). A Tabela 1 exibe a terminologia estabelecida pela NBR ABNT 11.682/2009 dos diferentes tipos de movimentação de massa passíveis de ocorrer:

Tabela 1- Terminologias adequadas para os tipos de movimento de massa

Terminologia dos tipos de movimento de massas	Definição
Queda/Rolamento	Desprendimento de fragmentos do terreno, independentemente do tamanho, que precipitam em queda livre ou qualquer tipo de trajetória.
Tombamento	Movimento de massa em forma de balsa com eixo na base
Escorregamento	Movimento de massa por deslocamento sobre uma ou mais superfícies
Escoamento	Movimento de massa com propriedades de fluido com escoamento lento ou rápido

Fonte: ABNT NBR 11.682 (2009)

Através da avaliação de dados da geologia, geomorfologia, pedologia, declividade, pluviosidade, cobertura e uso da terra, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), publicou um estudo referente a suscetibilidade de deslizamento de terra no Brasil, indicando que 5,7% da extensão territorial nacional possui alta suscetibilidade a deslizamentos e que a maior parte desse risco está concentrada nos estados da região sudeste com 23,2% de áreas em muito alto risco, tal como se observa na Figura seguinte (Belandi & Da Costa, 2019):

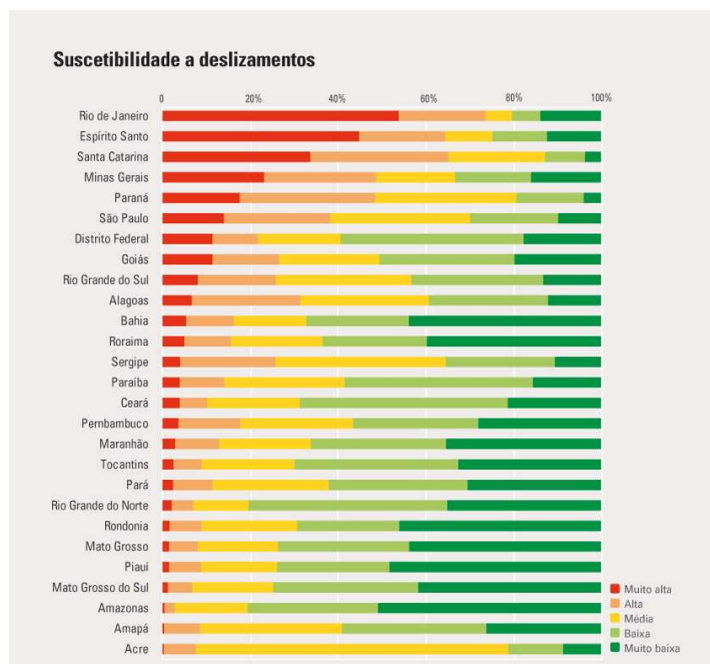


Figura 1. Classificação de suscetibilidade de deslizamentos por estado
Fonte: Belandi & Da Costa (2019)

2.2 Fatores de segurança de estabilidade de taludes

Taludes ou encostas são maciços de solo, rochosos ou mistos que possuem uma superfície inclinada, que podem ser de origem natural formada através de processos geológicos ou processos antrópicos tais como corte ou aterro (Britto & Fiori, 2021).

O fator de segurança (parâmetro utilizado para cálculos da estabilidade de talude/encosta), é a razão entre a tensão cisalhante máxima disponível e a resistência atuante ao longo da superfície da estrutura de contenção e que no caso de uma encosta, existe o aumento da probabilidade de ruptura devido a variabilidade de materiais naturais. O fator de segurança deve cobrir as incertezas provenientes das condições naturais, das etapas do projeto e da construção de estruturas de contenção (ABNT NBR 11.682, 2009).

A definição do fator de segurança a ser utilizado em uma análise de estabilidade está diretamente relacionada ao impacto de uma eventual instabilidade no maciço contido, levando em consideração os impactos decorrentes de tal sinistro, como a verificação de possíveis perdas de vidas humanas e a possibilidade de danos materiais e ambientais. As Tabelas 2 a 4 exibem os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 11.682/2009 para a determinação do fator de segurança mínimo a ser obtido nas análises de estabilidade:

Tabela 2 - Nível de segurança contra perda de vidas humanas

Nível de segurança	Critérios
ALTO	- Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais, ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas. - Ferrovias e rodovias de tráfego intenso.
MÉDIO	- Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. - Ferrovias e rodovias de tráfego moderado.
BAIXO	- Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. - Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.

Fonte: ABNT NBR 11.682 (2009)

Tabela 3 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critérios
ALTO	- Danos Materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. - Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
MÉDIO	- Danos Materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. - Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
BAIXO	- Danos Materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. - Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: ABNT NBR 11.682 (2009)

Tabela 4 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	1,5	1,5	1,4
MÉDIO	1,5	1,4	1,3
BAIXO	1,4	1,3	1,2

- No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima deverão ser majorados em 10%. Alternativamente, poderá ser usado o enfoque semi-probabilístico indicado no anexo D.

- No caso de estabilidade de lascas/ blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

Fonte: ABNT NBR 11.682 (2009)

2.3 Estruturas de CONTENÇÃO

As estruturas de contenção (ou muros de arrimo), são elementos utilizados para realizar a estabilização de um maciço de solo e devem suportar todos os esforços provenientes do maciço contido, como também uma carga accidental de 20kPa, distribuída de maneira uniforme sobre a superfície do terrapleno a fim de que não ocorram instabilidades no solo contido (ABNT NBR 11.682, 2009). Os principais tipos de estruturas de contenção são:

- **Muros de gravidade:** Esse tipo de estrutura garante a contenção do maciço de solo através do seu peso próprio, os muros de gravidade se opõem aos empuxos horizontais através do seu peso próprio e são utilizados para conter desníveis abaixo de 5m, podem ser construídos de concreto, pedra, gabiões e até mesmo pneus usados (Gercovich, Saramago, & Danzinger, 2019).
- **Muros de flexão:** Esses tipos de contenção são resistentes aos empuxos por flexão esse tipo de muro utiliza parte do peso próprio do maciço arrimado e possui uma seção transversal em forma de “L”, na qual se apoia para que se mantenha em equilíbrio (ABNT NBR 11.682, 2009)
- **Estruturas ancoradas:** São estruturas que garantem a estabilidade do maciço através de tirantes ancorados, podendo ter a sua estrutura contínua, em grelha, em placas ou em contrafortes (ABNT NBR 11.682, 2009).
- **Estruturas de solo reforçado:** São estruturas construídas através da introdução de elementos resistentes à tração no solo, tais como fitas metálicas, mantas geotêxteis, malhas de aço, etc. Sendo os seus principais componentes o solo do aterro, os elementos de reforço e os elementos da face, entretanto os elementos da face não possuem função estrutural (Benjamin, 2006).

2.3.1 Estruturas de CONTENÇÃO em Gabiões

Gabiões são gaiolas feitas com a utilização de telas metálicas em malha hexagonal de dupla torção, que são preenchidas com rochas e unidas umas às outras por meio de amarração,

formando uma estrutura monolítica para contenção de maciços terrosos, (Santa et al., 2022). A Figura 2 exhibe os componentes estruturais de um gabião tipo caixa, que possui o formato de paralelepípedo e adequado para construção de obras de contenção. A Figura 3 apresenta uma obra de contenção utilizando este procedimento executivo.

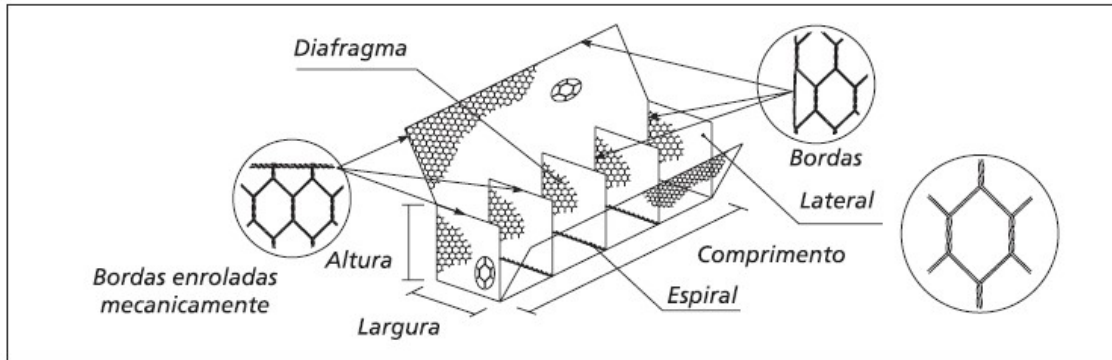


Figura 2. Elementos do gabião tipo caixa
Fonte: Barros et al.(2017)



Figura 3. Estrutura de contenção feita com gabião
Fonte: Maccaferri (2021)

Os muros de contenção executados com gabiões são classificados como muros de gravidade, pois é seu peso próprio que irá opor-se ao empuxo exercido pelo maciço contido e, da mesma forma que outros tipos de estruturas de contenção, análises de estabilidade deverão ser conduzidas. As análises a serem conduzidas são as seguintes: estabilidade global; estabilidade local e interna (Santos Júnior, 2018), e são apresentadas na Figura a seguir:

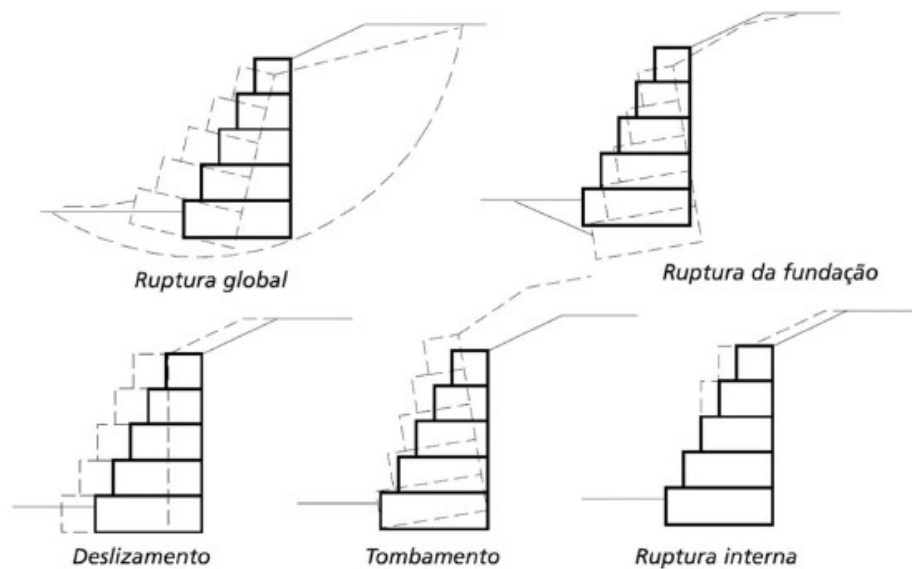


Figura 4. Verificações de estabilidade em muros de contenção de gabião
 Fonte: Barros (2010)

Segundo Barros et al. (2017), as principais vantagens da utilização dos muros de contenção em gabiões são as seguintes:

- **Homogeneidade:** Devido as amarrações executadas entre as gaiolas, a estrutura de contenção em gabião possui as mesmas características de resistência em qualquer ponto da estrutura.
- **Resistentes:** Em caso de ruptura em alguns arames, a tela não desfiará devido as malhas utilizadas serem de dupla torção.
- **Duráveis:** Os arames são revestidos por uma liga de zinco-alumínio resistente a corrosão e quando aplicados em zonas litorâneas ou com alto grau de contaminação, recebem um revestimento adicional de plástico.
- **Armadas:** Resistem a solicitações de tração e corte, sendo que a armadura suporta e distribui os esforços de tração que agem sobre a estrutura e também adapta a contenção em caso de assentamentos ou recalques que acontecem em caso de apoio em solos com baixa capacidade de suporte.
- **Flexíveis:** Estrutura adaptável a acomodações e movimentações do terreno, sem perda significativa da sua estabilidade e eficiência, em grande parte dos casos a estrutura deforma muito antes do colapso, permitindo a realização de intervenções de recuperação.

- **Permeáveis:** estrutura totalmente permeável dispensando a necessidade de um sistema de drenagem, aliviam por completo o empuxo hidrostático sobre a estrutura.
- **Práticas e versáteis:** Com facilidade construtiva e utilização de materiais secos, como gabiões, pedra e tábuas (para gabaritos), as estruturas de gabião são feitas com a utilização ou não de equipamentos mecânicos e sob qualquer condição ambiental, mesmo em locais de difícil acesso.

Além do gabiões caixa, existem dois outros tipos, que são o gabiões tipo saco e os gabiões tipo colchão. Os gabiões tipo saco possuem um formato cilíndrico e geralmente são utilizados como apoio para estruturas de contenção, em casos de presença de água ou de solos com baixa capacidade de suporte (Santa et al. 2022).

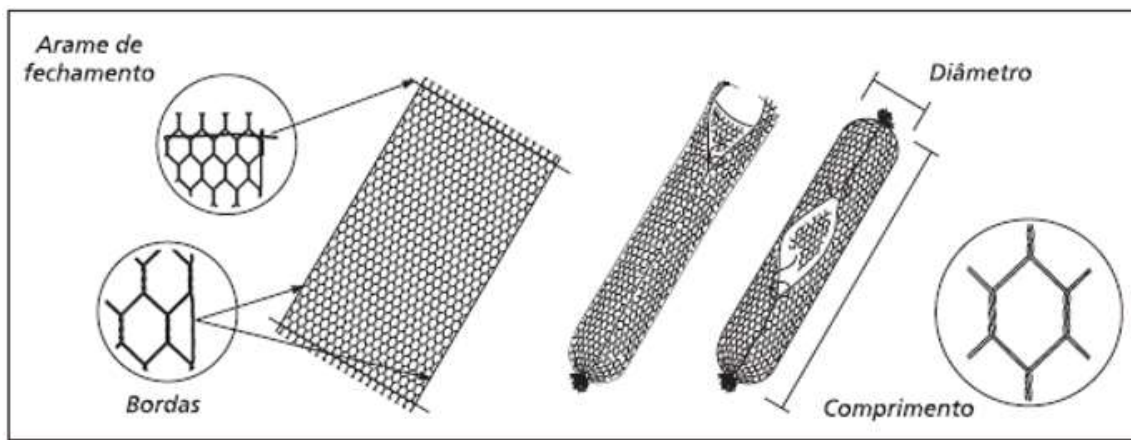


Figura 5. Elementos do gabião tipo saco
Fonte: Barros et al.(2017)

Os gabiões tipo colchão Reno®, também possuem o formato de paralelepípedo, entretanto possuem pequena espessura, quando comparados aos gabiões tipo caixa. Esse tipo de gabião é utilizado principalmente como revestimento de margens e fundos de cursos d'água, mas possui aplicações complementares tais como canaleta para drenagem, revestimento de taludes e plataforma de deformação que servem de proteção a bases dos muros Barros et al (2017).

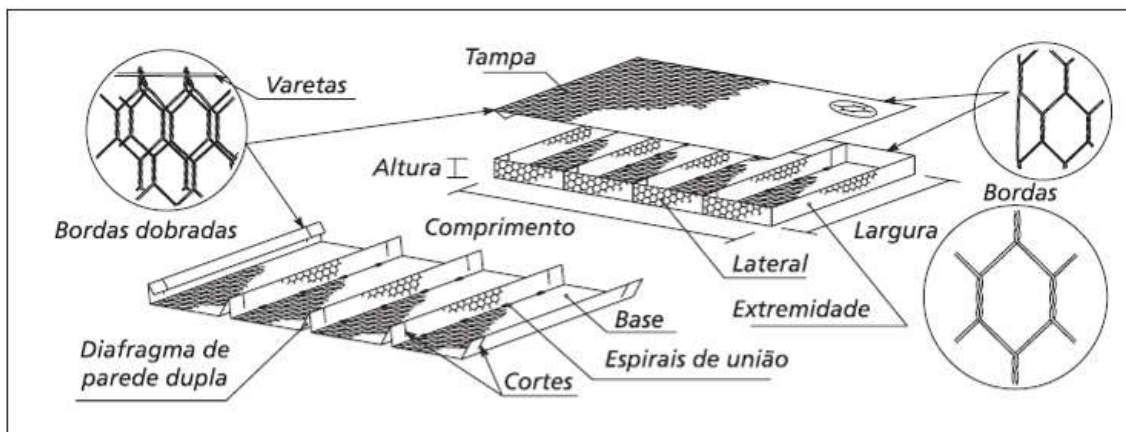


Figura 6. Elementos do gabião tipo colchão
Fonte: Barros et al.(2017)]

As contenções de gabiões caixa possuem espaços vazios, em função dos diferentes tamanhos das pedras usados no preenchimento das gaiolas, o que em alguns casos permite que a vegetação local cresça por dentro do muro, o que contribui para a integração da estrutura no local e auxilia na drenagem do solo (da Cruz & Braghin, 2016).



Figura 7. Integração da vegetação local na contenção de gabião caixa.
Fonte: da Cruz & Braghin, 2016

A contenção do córrego Macambira, na cidade de Goiânia (GO), foi executada utilizando gabiões tipo caixa e o revestimento do fundo do curso d'água foi executado em gabiões tipo colchão Reno®. Esse projeto não levou em conta somente a questão financeira do custo da obra, pois ao realizar um comparativo entre o custo para fazer essa mesma obra

utilizando a solução em concreto armado, verificou-se que o custo unitário por metro cúbico da solução em gabião era superior. A escolha também levou em consideração outros critérios para a escolha do gabião como solução, tais como o atendimento dos princípios de resistência, desempenho e durabilidade, além de vantagens adicionais, como o tempo de execução da obra com gabiões ser menor e o fato do método construtivo da contenção utilizando gabiões possuir baixo impacto ambiental (Zakan, 2019).



Figura 8. Execução da obra no córrego Macambira
Fonte: (Zakan, 2019).

2.4 Monitoramento de Integridade Estrutural

A estratégia de monitoramento contínuo, utilizando um sistema de detecção que seja capaz de disponibilizar informações que possibilitem a localização, a avaliação e o acompanhamento da evolução de possíveis danos em uma estrutura é chamado de Structural Health Monitoring (SHM). Sendo chamados danos, as alterações nos elementos, propriedades materiais e geométricas de uma estrutura, que podem afetar seu desempenho atual ou futuro, impossibilitando sua utilização de forma parcial ou completa e a estratégia de monitoramento de uma estrutura pode ajudar a identificá-los (Farrar et al., 2009).

De forma resumida, o objetivo do SHM é a detecção de danos e avaliação de condições, não existindo um modelo de estratégia pré-definido para a implementação de um SHM, entretanto, é possível encontrar na sua implementação a utilização de vários tipos de sensores, dispositivos de aquisição de dados, métodos de transmissão de dados, banco de dados para gerenciamento, análise e modelagem dos dados e interfaces de usuário para visualização. Com

o avanço da tecnologia, recursos como *Big Data* e Inteligência Artificial também podem fazer parte de ferramentas que auxiliam a implementação do SHM (Sun et al 2020).

O monitoramento da integridade de estruturas que compõem a infraestrutura de uma cidade (tais como, pontes, rodovias, túneis, contenções, etc.), é uma das aplicações mais importantes do SHM pois, por meio desse monitoramento é possível realizar atividades de manutenção e reparo de forma preventiva e preditiva, aumentando o tempo de vida útil das mesmas (Chen, 2018).

Por tratar-se de um conceito multidisciplinar, geralmente encontram-se profissionais das mais diferentes áreas (engenheiros civis, engenheiros eletrônicos, analistas de sistemas) atuando no propósito de extrair o máximo de informações possíveis da estrutura analisada (Rainieri, Fabbrocino, Lanzano & Magistris, 2010).

2.4.1 Sensores utilizados para monitoramento de estruturas

Sensores são dispositivos tecnológicos capazes de identificar propriedades físicas, químicas e biológicas, convertendo-as em sinais que podem ser medidos por equipamentos adequados. Estes são o item mais crítico de uma estratégia de SHM, pois a qualidade de uma análise está diretamente relacionada a qualidade do dado coletado (Ferreira et al, 2022).

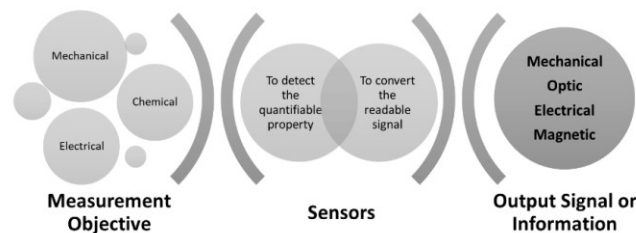


Figura 9. Princípio do funcionamento de um sensor
Fonte: Ferreira et al, 2022

A tabela 5 exhibe alguns tipos de sensores que podem ser utilizados em uma estratégia de monitoramento de uma estrutura, suas possibilidades de aplicação e o range típico de medição.

Tabela 5 - Tipos de sensores e aplicações de medição

Sensor	Medição	Range típico de medição	Tipo de saída
Acelerômetro triaxial	Aceleração em três direções ortogonais	± 30 g	Analógica
Extensômetro de cordas vibrantes	Deformação no concreto	± 4000 $\mu\epsilon$	Analógica
Célula de Carga	Carregamentos na estrutura	100 kN à 10,000 kN	Analógica

Strain Gauge soldável	Deformação em estrutura de aço	$\pm 3500 \mu\epsilon$	Analógica
Transdutor de deslocamento	Deslocamento uniaxial	$\pm 500 \text{ mm}$	Analógica
Anemômetro ultrassônico triaxial	Velocidade do vento	0 à 100 m/s	digital
Termo higrômetro	Temperatura do ar	$-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+60 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Analógico
	umidade relativa do ar	0 à 100%	Analógico
Sensor de Temperatura	Medição de temperatura em aço, concreto ou pavimento	$-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+60 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Analógico

Fonte: Adaptado de (Chen, 2018)

A utilização de sensores para monitoramento estrutural não é uma prática recente, como exemplo da utilização de sensores para monitoramento estrutural, pode-se citar os seguintes trabalhos:

Na pesquisa desenvolvida por Wong & Ni (2011), existe a referência ao SHM composto de 283 instrumentos, divididos em 8 grupos de sensores, associados a 3 estações de aquisição de dados, que estão em funcionamento na ponte Tsing Ma em Hong Kong, desde a sua inauguração em 1997, permitem o monitoramento do comportamento da estrutura durante toda a sua vida útil. A Figura seguinte traz a localização dos sensores instalados.

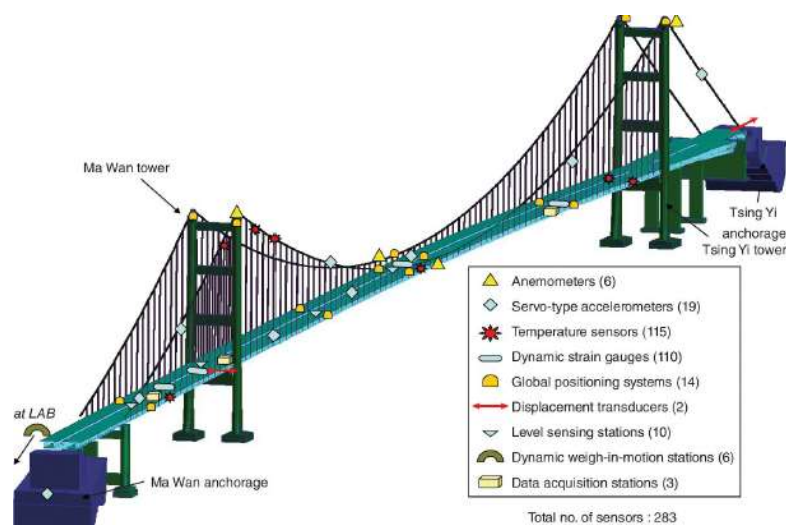


Figura 10. Sensores instalados na ponte Tsing Ma – Hong Kong
Fonte: Wong & Ni, 2011

Os principais pontos de monitoramento, realizado através da instrumentação presente nessa ponte, incluem o monitoramento de carga de tráfego rodoviário e ferroviário, estresse e de fadiga durante a vida útil da estrutura. Outras partes do monitoramento incluem carga de vento, temperatura, geometria, características dinâmicas globais, articulação e coeficiente de influências estáticas (Wong & Ni, 2011).

Lobato, Neto, Amador, Souza e Sampaio (2009), instalaram 16 acelerômetros ao longo do tabuleiro de uma ponte e os conectou a um sistema de aquisição de dados, que armazena as leituras dos sensores, que servirão como base para modelos computacionais.

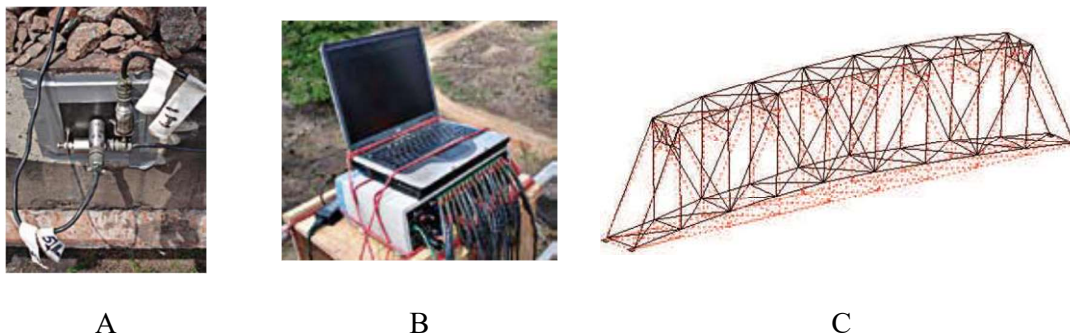


Figura 11. Coleta de dados da vibração de uma ponte ferroviária – (A) Acelerômetro instalado no tabuleiro; (B) – Datalogger conectado ao computador; (C) Forma modal resultante
Fonte: Lobato et al. (2009)

Verificou-se que dependendo da velocidade e das irregularidades nos rodaios, a cada passagem de comboio a ponte era excitada de maneira distinta. Através do monitoramento da vibração da ponte, realizado pelos acelerômetros, cujas leituras ficaram armazenadas no Datalogger, foi possível determinar a forma modal completa da estrutura da ponte. Os dados coletados pelos sensores, serviram de referência para calibrar o modelo computacional criado para reproduzir o comportamento estático e dinâmico da estrutura, possibilitando a análise do primeiro modo de flexão lateral e do primeiro e segundo modo de flexão transversal da ponte, concluindo que os primeiros modos de flexão da estrutura, com frequências naturais abaixo de 6Hz, são mais influenciados pela passagem de comboios em velocidade de cruzeiro, do que os modos de flexão com frequências naturais acima de 6Hz (Lobato et al. ,2009).

2.4.2 Instrumentações para monitoramento de estruturas de contenção

O engenheiro geotécnico responsável pelo projeto de uma estrutura de contenção, deve considerar no projeto executivo a possibilidade de monitoramento da estrutura, definindo quais instrumentos deverão ser instalados em uma obra de contenção, indicando a periodicidade das inspeções à serem realizadas (ABNT NBR 11.682 ,2009).

Segundo Milititsky (2016), existem instrumentações adequadas para realização do monitoramento de variáveis referentes ao comportamento de taludes e de estruturas de contenção e que as atuais técnicas permitem não somente o monitoramento local, mas possibilitam que essas informações sejam registradas e transmitidas à distância para os

responsáveis pela avaliação da estrutura. A tabela 6 exhibe as medidas que são monitoradas, as instrumentações ou técnicas utilizadas para o monitoramento da estabilidade do terreno e de estruturas de contenção.

Tabela 6 - Instrumentações e técnicas para medição

Medidas	Instrumentação / Técnica
Deslocamento da superfície do terreno, da estrutura e do topo das paredes	Controle de recalques por topografia de precisão
Deformações horizontais da superfície do terreno, da estrutura e da parte exposta da parede	Métodos de levantamento (trena, medidor de distância eletrônico – EDM)
	Métodos de convergência
	Linhas de prumo
Deformações horizontais da subsuperfície do terreno	Inclinômetro
	Transdutor de corda vibrante
Deformação subsuperficial do terreno e dos serviços	Pontos de deslocamento subsuperficiais
	Extensômetros de haste
	Transdutor de corda vibrante
Empuxo de terra atuando sobre as paredes	Células de pressão total
Carregamentos nos escoramentos e nas ancoragens	Extensômetros de corda vibrante montados na superfície
	Strain gauges
	Macacos hidráulicos
	Células de carga
Pressão de água	Piezômetros
	Medidores de nível d'água automáticos
	Sensores de nível d'água elétricos
Levantamento de fundo da escavação	Extensômetros magnéticos
	Placas e pinos de recalque
	Transdutor de corda vibrante
	Inclinômetro
Mudança na espessura das fissuras em estruturas	Medidores de fissuras
Temperatura das estroncas	Termômetro diferencial

Fonte: Militisky, (2016)

Em Mello (2020), foi realizado o monitoramento geotécnico e a avaliação de uma obra de escavação e contenção com aproximadamente 30m de profundidade, utilizando quatro inclinômetros, marcos superficiais para apoio de miras topográficas e *tell tales* nos taludes contidos. A Figura 12 exhibe o inclinômetro instalado para monitoramento da movimentação e

comportamento da estrutura. Os dados coletados a partir da medição de deslocamento capturadas pelos inclinômetros instalados e a variação do deslocamento em função da profundidade da escavação, são exibidos na Figura 13.



Figura 12. Inclinômetro instalado em campo
Fonte: Mello, 2020

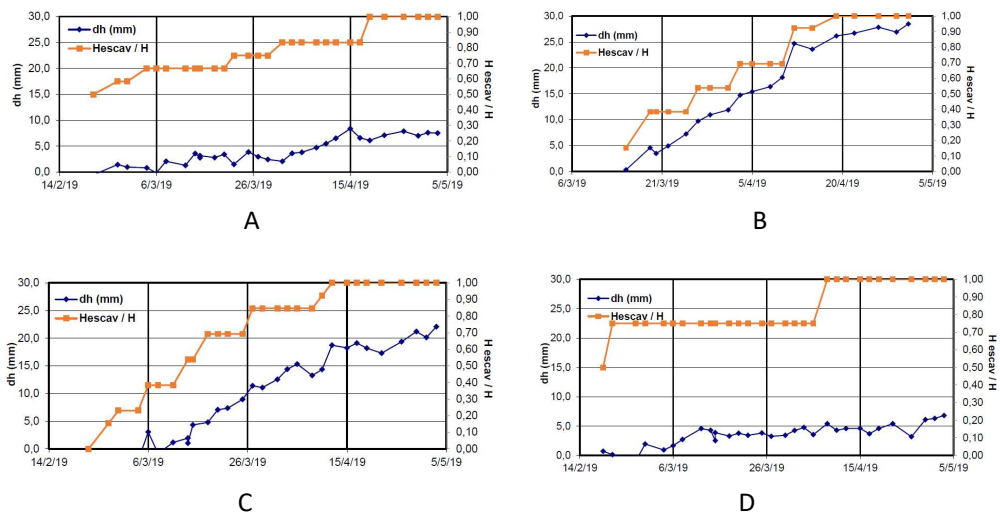


Figura 13. Deslocamento horizontal em função da profundidade da escavação.: A) Deslocamentos medidos pelo inclinômetro 1; B) Deslocamentos medidos pelo inclinômetro 2; C) Deslocamentos medidos pelo inclinômetro 3; D) Deslocamentos medidos pelo inclinômetro 4.
Fonte: Mello, 2020

Observando-se os valores apresentados nos gráficos da Figura 13, verifica-se que os inclinômetros foram capazes de mensurar os deslocamentos horizontais do maciço e que esses deslocamentos aumentavam em uma relação diretamente proporcional à profundidade da escavação (Mello, 2020).

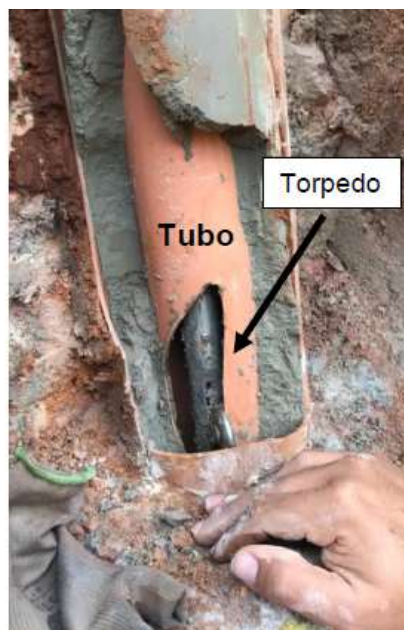


Figura 14. Dano em tubulação utilizada pelo inclinômetro.
Fonte: Mello, 2020

Durante a fase de monitoramento da execução da obra, verificou-se que um dos inclinômetros, havia ficado preso a uma profundidade de 10,65m, sendo uma movimentação mais expressiva do solo a causa de danificação da tubulação impedindo a leitura do deslocamento horizontal através do inclinômetro 2, durante um período superior a uma semana. (Mello, 2020).

O método tradicional de inspeção, no qual o profissional técnico se desloca em períodos pré-determinados até a estrutura, utilizando os instrumentos necessários para coleta de dados, é uma prática válida, entretanto existem ações dinâmicas e comportamentos estruturais que necessitam ser acompanhados com amostragens em intervalos menores, devendo-se ainda levar em consideração que muitas vezes os locais que devem ser inspecionados são de difícil acesso e perigosos (Araújo, 2017).

No artigo de Oliveira & Guimarães (2019), realizou-se o monitoramento de uma barragem de terra de uma PCH (Pequena Central Hidrelétrica), no estado de Minas Gerais. Os deslocamentos horizontais e verticais do maciço, foram medidos através de instrumentação topográfica e para o monitoramento da evolução das pressões que atuam no aterro e nas fundações da barragem foram utilizados quatro piezômetros.



Figura 15. Piezômetro Casagrande instalado na barragem de terra da PCHo.
Fonte: Guimarães e Oliveira, 2019

A Figura 16 apresenta as leituras de cada um dos piezômetros utilizados para monitoramento da barragem da PCH a partir do enchimento do reservatório em fevereiro de 2018.

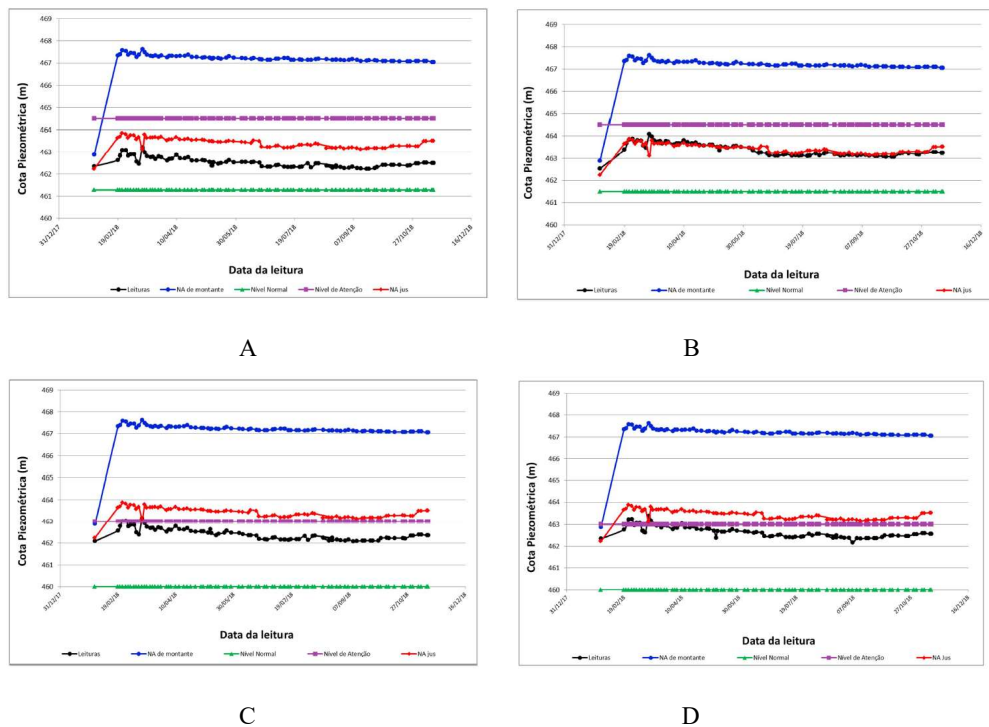


Figura 16. Leituras dos piezômetros da barragem da PCH durante o período de monitoramento – (A) Leituras piezômetro PC-201; (B) Leituras piezômetro PC-202; (C) Leituras piezômetro PC-203; (D) Leituras piezômetro PC-204;

Fonte: Guimarães e Oliveira, 2019

O monitoramento do nível d'água (NA), entre a parte anterior (jusante) e a parte posterior (montante) da barragem é importante, pois a erosão causada pela movimentação de partículas do solo, devido ao fluxo de água entre montante e jusante pode causar o efeito *piping*,

que evolui gradualmente até que uma brecha seja formada na barragem, levando ao colapso da estrutura (Zuculin, 2011).

De acordo com as análises interpretadas por Oliveira & Guimarães (2019), os instrumentos são sensibilizados pelo enchimento do reservatório e se comportam de acordo com a variação do mesmo, permitindo aos autores, identificar durante o período de monitoramento, que entre os meses de fevereiro e março os instrumentos chegaram próximos aos níveis de atenção, pois o nível da jusante estava próximo do valor de alerta, entretanto com a entrada do funcionamento da primeira unidade geradora da PCH, houve a diminuição do nível d'água na jusante da barragem e conseqüentemente a redução da carga piezométrica dos instrumentos. Entretanto, apesar de dados fornecidos pelos instrumentos, os autores recomendam a manutenção das rotinas de inspeção visual, de forma a subsidiar a avaliação do comportamento da estrutura.

2.5 Sensores de aceleração do tipo MEMS (*Micro EletroMechanical Systems*)

Em função dos avanços da microeletrônica, foi possível desenvolver sensores de pequenas dimensões e com alta precisão, que podem fazer parte da composição de dispositivos mais complexos, permitindo que os mesmos possuam a capacidade de extrair dados do ambiente.

Os sensores MEMS (*Micro EletroMechanical Systems*), são microdispositivos fabricados através métodos semelhantes ao de fabricação de circuitos integrados e quando comparados a sensores comuns são mais compactos, integráveis e possuem um baixo custo devido a sua fabricação em lotes (Liu et al., 2022). A Figura 17 apresenta um exemplo de sensor ultrassônico MEMS.

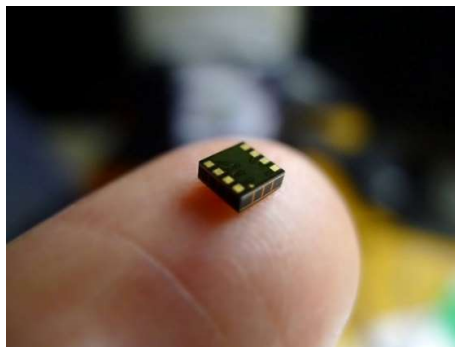


Figura 17. Sensor ultrassônico MEMS da TDK
Fonte: i-Micronews (2018)

Os acelerômetros MEMS são basicamente de dois tipos: o piezoresistivo, que possuem um maior range de medida, porém com baixa precisão e que são aplicados para medição de choques e explosões; o de capacitância variável que são dispositivos de grande sensibilidade e de um range menor de medida e são utilizados para monitoramento estrutural e sistemas com aceleração constante (Piesotronics, 2018)

Para medir a aceleração, o sensor tipo acelerômetro possui uma massa de prova ancorada por feixes de suspensão. Quando uma aceleração externa desloca essa massa de prova, o descolamento provocado em relação a posição inicial é diretamente proporcional a magnitude da aceleração (Sinha et al., 2014).

A Figura 18 exibe o esquemático do princípio de funcionamento de um acelerômetro MEMS capacitivo, que quando submetido a uma aceleração externa, sem a sua massa de prova deslocada causando um diferencial entre as capacitâncias C_1 e C_2 , que é diretamente proporcional ao seu deslocamento e inversamente proporcional a distância entre os eletrodos (Pedotti, 2019).

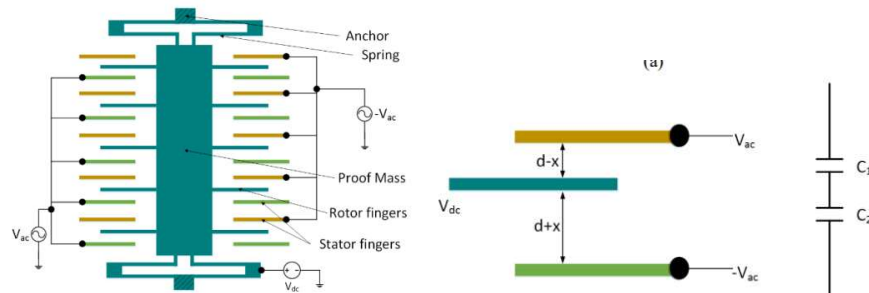


Figura 18. Esquemático do acelerômetro e capacitância diferencial
Fonte: Sinha et al, 2014

2.6 Internet das Coisas (IoT)

A IoT (*Internet of Things*) é umas das principais pontes entre o mundo físico e o mundo digital (Schwab, 2016). A Internet das Coisas não se trata de uma nova tecnologia, mas em de uma divisão da Tecnologia da Informação, resultado do desenvolvimento contínuo da tecnologia, especialmente na miniaturização de dispositivos eletrônicos e de novos protocolos de comunicação. O termo Internet das Coisas, foi mencionado pela primeira vez em 1999, por Kevin Ashton em uma apresentação para a Procter & Gamble (Mouha, 2021).

O conceito de Internet of Things (IoT) está relacionado com duas palavras sendo “Internet” o sistema global de comunicação que utiliza o protocolo TCP/IP para conectar redes

de computadores e “Things” (traduzido do inglês “coisas”) que são objetos que tem a capacidade de comunicação (envio ou recebimento de dados) e processamentos aliados a sensores, possibilitando a captura de dados dos ambientes onde estão inseridos (Lamonaca et al.,2018).

A IoT permite que coisas, tais como objetos pessoais, máquinas, sensores, entre outros, possam ser conectados à internet permitindo a troca de informação entre si ou com outras plataformas, disponibilizando dados, que podem gerar informações úteis a determinadas aplicações (Filho,2014).

Os dispositivos IoT devem possuir capacidade computacional e possibilidade de conexão à internet (Pedotti ,2019). Um dispositivo IoT deve possuir interfaces que permitam coletar dados externos, capacidade de processamento e conectividade para transmissão de dados através da internet (Ray, 2018).

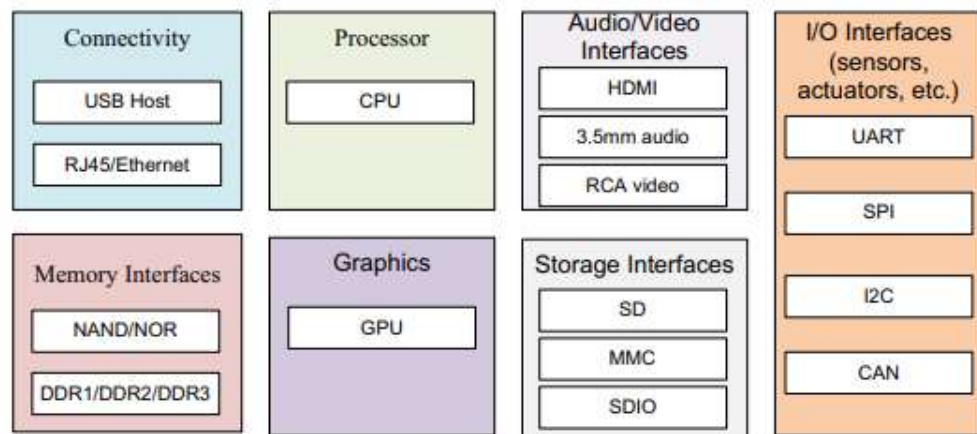


Figura 19. Componentes de um dispositivo IoT
Fonte: Ray (2018)

A Internet das coisas é a tecnologia promissora para soluções que visam atender questões de mobilidade, saúde, energia e infraestrutura civil, criando uma rede de objetos ciber-físicos e tornando-se um dos principais pilares da construção de uma nova geração de cidades inteligentes (Alavi et al., 2018).

Segundo Pedotti (2019), os requisitos básicos de uma solução baseada em internet das coisas são os seguintes:

- **Sensoriamento** - Possuir sensores capazes de medir fenômenos para coleta de informações necessárias à aplicação (vibração, temperatura, umidade, posição, entre outros).

- **Processamento** - Possuir capacidade de processamento através de microcontroladores ou processadores de dados coletados ou recebidos.
- **Conectividade** – Possuir protocolos de comunicação e meios de transmissão de dados (Bluetooth, Wi-Fi, LoRA, 5G, entre outros.).
- **Serviço** – Fazer parte de um modelo de negócios no qual o dispositivo está inserido (transporte, comércio, agronegócio, lazer, etc).

A utilização de um sensoramento adequado, de dispositivos IoT, em conjunto com as funcionalidades encontradas nas plataformas em nuvem para armazenamento e modelamento de dados, tornam possível a criação de estratégias de SHM, para o monitoramento das condições de integridade para praticamente todos os tipos de estruturas da construção civil.

Diversos trabalhos acadêmicos foram realizados para demonstrar a utilização de dispositivos IoT como parte de um sistema de monitoramento estrutural, dentre eles podemos destacar:

- Miao, Yang, Wang e Tong (2019), apresentam em seu artigo científico o desenvolvimento de um sensor de aceleração sem fio de baixa potência que se conecta a nuvem através de um gateway. O sistema desenvolvido foi validado em um teste de campo na ponte Chijing em Xangai. Considerado pelos autores como um sistema IoT promissor, completo, prático, prontamente disponível e de baixo custo para monitoramento da integridade de pontes.
- Penchala, Patil, Nimbalkar, Kamble e Mudala (2019) utilizam um dispositivo IoT, que além da fazer verificação do nível da água na ponte, também mede a inclinação da mesma através de um Tilt-sensor, caso vibrações de alta amplitude sejam detectadas na ponte, uma mensagem de alerta imediatamente será transmitida para a delegacia de polícia, secretaria municipal e para a equipe de risco da cidade.
- Kusal, Argarde, Chiplunkar, Kumbhar e Rhode (2018) desenvolveram um sistema que detecta a carga dos veículos e o nível de água na ponte. Verificando se o nível da água e a carga do veículo na ponte cruza seu valor limite e então gera o alerta por meio de uma campainha e da barreira automática. O sistema desenvolvido, possui uma interface baseada em HTML5 e pode ser acessada

através de navegadores web o que permite o monitoramento remoto do comportamento da ponte.

- Adamassu, Lynch e Zekkos (2019), desenvolveram um protótipo de um sistema wireless alimentado através de energia solar, capaz de coletar informações referentes a muros de contenção e enviá-los para nuvem através de conexão 4G.

2.6.1 Tecnologias wireless para transmissão de dados

A utilização de redes de comunicação wireless para transmissão de dados é uma alternativa viável para realizar a conexão de dispositivos, sem que seja necessário levar uma infraestrutura de rede até o ponto de coleta de dados, o que em determinados casos pode inviabilizar a implementação da solução IoT.

Atualmente, existem diversos tipos de tecnologia wireless, capazes de habilitar dispositivos à transmissão de dados via internet, entretanto é necessário verificar quais são os requisitos da aplicação (por exemplo distância, velocidade de transmissão, consumo de energia), antes de escolher o método de transmissão wireless do dispositivo IoT.

Tabela 7 - Principais tecnologias de redes wireless

Tecnologia	Frequência (MHz)	Penetração	Range	Largura de banda	Consumo
LoRa	433	Baixa	Muitos quilômetros	50 kbps	Baixo
Dash7	433	Alta	1km	200 kbps	Baixo
Zigbee	868/915/2.400	Baixa/alta	100m	250 kbps	Baixo
Bluetooth	2.483,5	Low	100 m	800 kpbs	Baixo
3G	700 – 2.600	Baixa/alta	Muitos quilômetros	3.6–21 Mbps	Alto
4G/4G LTE	700 – 2.600	Baixa/alta	Muitos quilômetros	100 Mbps +	Alto
NFC/RFID	13,56	Alta	10cm	106-424 Mbps	Baixo
5G	700 – 2.600	Baixa/alta	Muitos quilômetros	500 Mbps +	Alto
Wi-Fi	2.400	Baixa	32m	1.300 Mbps	alto

Fonte: Adaptado de Ray (2018)

2.7 Computação em nuvem

Computação em nuvem é o termo utilizado para designar servidores virtuais distribuídos ao redor do planeta e que são acessados através da internet. Esses servidores podem armazenar informações específicas, sistemas, podem executar programas e até mesmos fornecer conteúdo.

A possibilidade de contratar uma determinada configuração de hardwares e pacotes de softwares para manipulação ou armazenamento de informações, pagando em muitos casos somente pelo volume de dados trafegado ou armazenado, destaca um dos principais benefícios da computação em nuvem que é a redução de custos (Srivastava & Khan, 2018).

O acesso à tecnologia de computação à nuvem possibilita a implementação de soluções mais rápidas e econômicas, quando comparada ao investimento de tempo e recursos que seriam destinados a criação de uma infraestrutura para operação de softwares e plataformas, pois atualmente os provedores de soluções em nuvem fornecem tal infraestrutura a preços acessíveis (Ahad et al., 2020).

A computação em nuvem é um dos grandes aliados a tecnologia IoT, devido ao crescente número de consumidores e as requisições computacionais de um dispositivo IoT, torna necessário utilizar recursos de servidores virtuais para armazenamento e processamento de enormes quantidades de dados (Dang et al., 2019).

Existem provedores que fornecem serviços de computação em nuvem com recursos específicos para implementação de sistemas IoT, as chamadas plataformas IoT, disponibilizando serviços de banco de dados, monitoramento de tráfego, dashboards, ferramentas para implementação de aplicações e controle de conectividade (Brandão, 2022).

Temos grande provedores disputando tanto no quesito recursos oferecidos quanto no quesito preço, ajudando ainda mais na economia da implementação de um sistema IoT, entre os grandes provedores temos Amazon, Google, Microsoft e IBM, que inclusive disponibilizam acesso às suas plataformas por períodos de testes sem cobrança pelos serviços. Entre diversas plataformas IoT de computação em nuvem, tais como *Arduino IoT Cloud*, *Microsoft Azure*, *Google Cloud IoT*, *ThingSpeak*, *IBM Cloud*, entre outras.

Um excelente exemplo da integração das tecnologias IoT e *Cloud Computing* pode ser encontrado no trabalho de Pedotti (2019), que desenvolveu em sua tese de doutorado um dispositivo IoT de baixo custo para realizar o monitoramento da vibração de máquinas rotativas, através de um dispositivo Arduino EPS32 e um acelerômetro modelo MMA8451Q. A

comunicação sem fio desta solução foi o Wi-Fi e plataforma de computação em nuvem adotada foi o IBM Watson for IoT Platform.

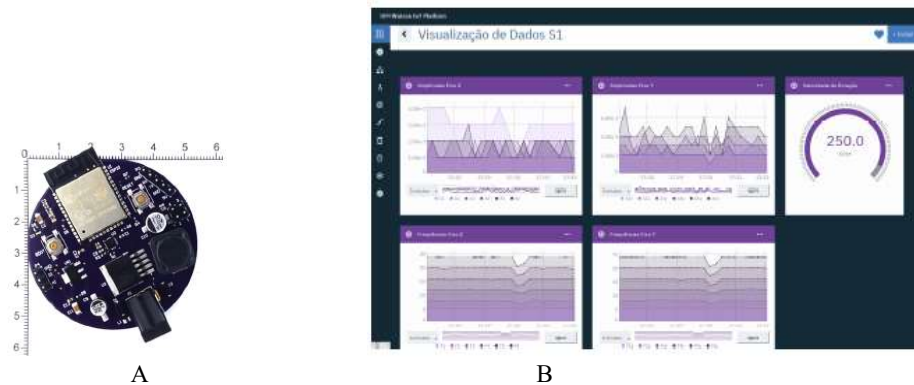


Figura 20. (A) Dispositivo IoT desenvolvido escala em centímetros; (B) Dashboards gerados na Nuvem IBM
Fonte: Pedotti (2019)

2.8 Engenharia civil 4.0

A indústria 4.0 contribuiu para que as tecnologias sejam aplicadas para todos os segmentos industriais, reduzindo custos e aumentando ritmos de produção sem que houvessem impactos negativos na qualidade do produto entregue. Os profissionais de engenharia civil podem se beneficiar das ferramentas tecnológicas disponibilizadas pela indústria 4.0, para planejar e desenvolver atividades dentro da indústria da construção civil (Souza, 2019).

A construção civil tem utilizado de forma gradativa, ferramentas e recursos que permitem automatizar e controlar processos, além de utilizar metadados de clientes para formação de uma rede de produção mais complexa (Miyasaka et al., 2018).

Existe uma expectativa que no futuro será possível automatizar todo o canteiro de obras, utilizando ferramentas BIM (*Building Information Modeling*), drones, robôs para executar trabalhos braçais, realidade aumentada, entretanto, sem a Internet das Coisas, o canteiro de obra totalmente automatizado é uma ideia distante, pois é a IoT que permite a comunicação e o gerenciamento de informações entre objetos do mundo físico e o mundo virtual, reduzindo o uso do papel e se aproximando da utilização de inteligência artificial (Lima, 2017).

Como exemplos de tecnologias utilizadas pela construção civil, podem ser citadas as seguintes:

- BIM (*Building Information Modeling*), apesar do custo de um projeto feito com softwares BIM ser superior ao de projetos feitos com softwares 2D, a sua

utilização reduz os riscos dos erros de execução e possibilita identificar possíveis problemas antes do início da execução da obra (Janchikoski et al.,2022).

- Drones: Os drones tem sido amplamente utilizado na construção civil, para realização de inspeções em lugares de difícil acesso, para realização de levantamentos topográfico e acompanhamento de obras (Jesus et al., 2019).
- Realidade virtual: através da utilização da realidade virtual é possível realizar treinamentos das equipes antes que elas sejam enviadas para campo, o que auxilia na capacitação da mão de obra e na diminuição de acidentes.

A tecnologia IoT, permite a integração de sensores nos EPIs utilizados pelos trabalhadores. Um exemplo dessa aplicação são os coletes desenvolvidos pela *VirgiaTech*, que enviam sinais para os equipamentos (escavadeiras, motoniveladores, rolos compactadores, etc.), alertando sobre a presença do usuário próximo a máquina, auxiliando dessa forma a redução de acidentes como atropelamentos em obras (Barduco & Constâncio, 2019).



Figura 21. Colete IoT InZoneAlert
Fonte: Engineering News-Record (2015)

3 Metodologia

Quanto a sua abordagem, essa pesquisa caracteriza-se como quantitativa de natureza aplicada, pois apresenta o levantamento e o registro de características do comportamento de um fenômeno, que é no caso desse trabalho, a inclinação do muro de contenção monitorado e o correlaciona com as atividades de execução durante o período de monitoramento.

No que se refere aos procedimentos, este trabalho possui características práticas de pesquisa compatíveis com o procedimento metodológico do tipo pesquisa-ação. Segundo Hammond e Wellington (2013), “A pesquisa-ação procura abordar problemas sociais e profissionais através de um ciclo iterativo de ação e reflexão” (p. 04).

A pesquisa ação propõe que o pesquisador adote uma postura colaborativa e interativa, para que junto com os participantes sejam realizadas as compreensões de situações e transformações de práticas, a fim de promover processos de mudança em um determinado ambiente (Thiollent, 2022).

3.1 Componentes utilizados no equipamento

Neste item serão descritos os componentes de hardware e software, bem como detalhes da programação feita tanto no dispositivo, quanto na plataforma em nuvem, além de detalhar acerca do método de transmissão e armazenamento de dados utilizados para criação do dispositivo IoT responsável pelo monitoramento da inclinação do muro de contenção em gabião caixa executado na zona leste de São Paulo.

3.1.1 Sensor MPU6050

O MPU6050, utiliza a tecnologia MEMS (do inglês Micro-Electro-Mechanical Systems), possuindo dentro do invólucro do seu chip, um sensor de aceleração (acelerômetro) e um sensor de giro (giroscópio), ambos triaxiais, permitindo o monitoramento da aceleração (m/s^2) e da velocidade angular (rad/s) nos eixos x,y e z. Além do acelerômetro e do giroscópio o MPU6050 também possui um sensor de temperatura, entretanto o mesmo não foi utilizado nesse projeto.

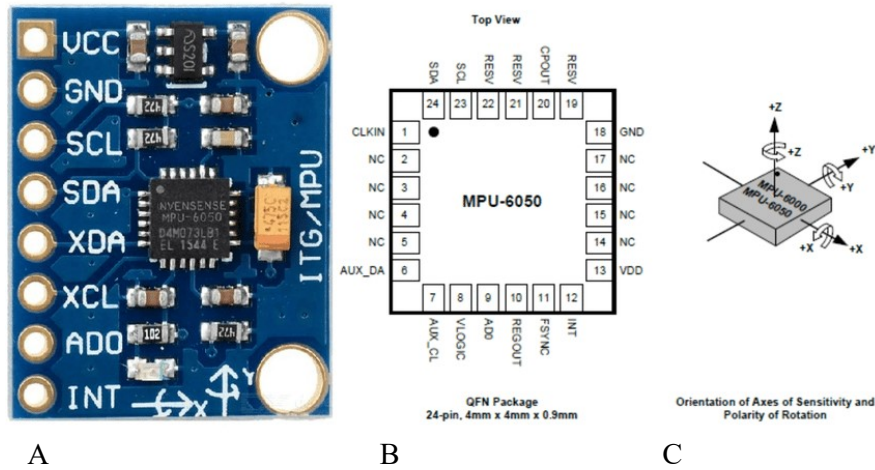


Figura 22. (A) Placa MPU6050; (B) pinagem do chip; (C) orientação dos eixos dos sensores.
Fonte: Fabricante InvenSense

De acordo com as especificações do fabricante, tanto o sensor de aceleração como o giroscópio possuem uma precisão de 0,5% e o sensor de temperatura do MPU6050 possui a precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$.

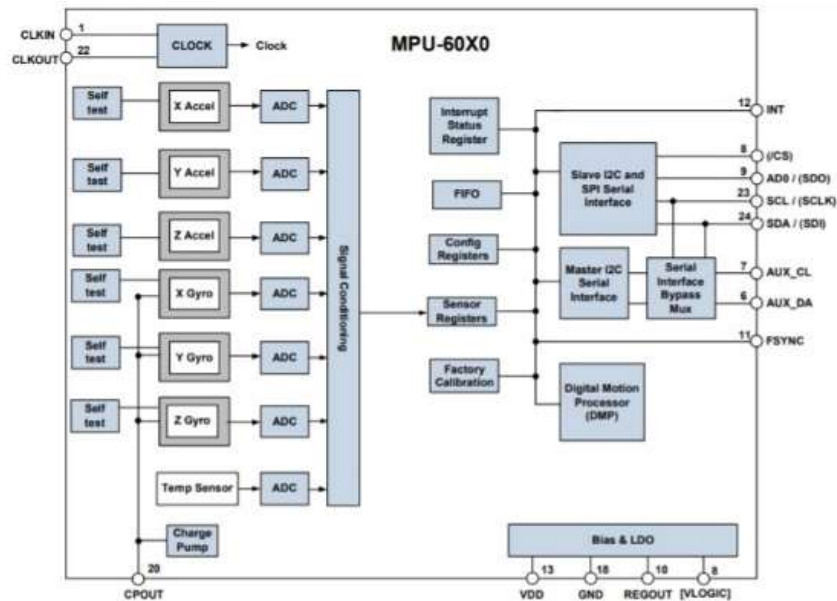


Figura 23. Blocos internos do chip MPU6050
Fonte: Fabricante InvenSense

O MPU6050 possui uma interface serial (Slave I2C and SPI Serial Interface) que é acessada através dos pinos SCL e SDA, permitindo que um microcontrolador (que possua uma interface serial compatível) envie comandos capazes de configurar, calibrar e ler os registros dos seus sensores internos.

3.1.2 Placa de desenvolvimento TTGO T-Call ESP32

O TTGO T-Call ESP32 é uma placa de desenvolvimento composta de dois módulos principais, sendo o primeiro um microcontrolador ESP32 dual core de 32 bits, com clock de 240MHz de clock, 4MB de memória Flash e 8MB de memória PSRAM. Esse microcontrolador possui entradas e saídas digitais, analógicas, interfaces de comunicação do tipo I2C, SPI, UART, SDIO, I2S, CAN e opções de conectividade através de Wi-Fi e Bluetooth. O segundo módulo da placa de desenvolvimento TTGO T-Call ESP32, é o modem GSM/GPRS, modelo modelo SIM800L, com entrada para SIM Card, que permite o envio e recebimento de dados, utilizando o plano de internet de operadoras de telefonia celular de mercado.

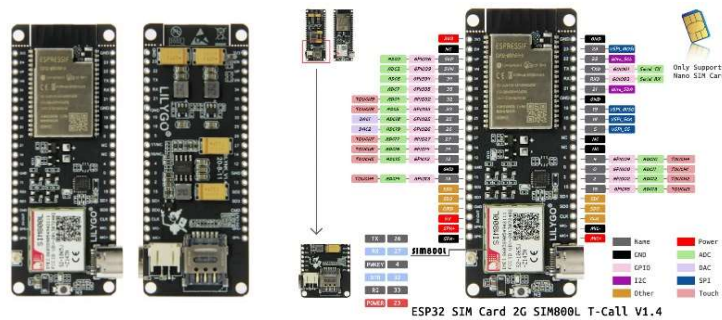


Figura 24. Placa de desenvolvimento TTGO T-Call e funções dos pinos
Fonte: GitHub

O TTGO T-Call ESP32 fornece uma tensão de alimentação de 3,3VCC, que é necessária para energizar os circuitos eletrônicos do MPU6050. A interface serial de ambos deve ser interligada para o microcontrolador seja capaz de configurar e trocar dados com o sensor.

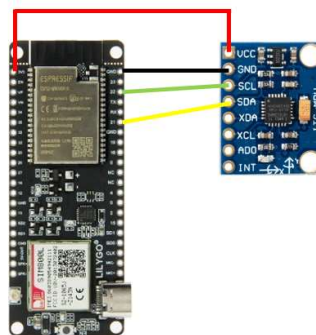


Figura 25. Conexão entre TTGO T-Call e MPU6050
Fonte: Autoria própria

3.1.3 Montagem do dispositivo IoT

Para montagem de um dispositivo IoT, utilizado para monitoramento remoto da inclinação do muro de contenção, utilizou-se a seguinte quantidade dos itens abaixo:

Tabela 8 - Quantitativo e preços dos principais componentes do IoT

Item	Quantidade	Descrição	Preço Total
01	01	Placa de desenvolvimento modelo TTGO T-Call ESP32	R\$ 186,14
03	01	Placa MPU6050	R\$ 27,90
04	01	SIM Card (com plano de internet)	R\$ 10,00
05	01	Caixa de junção IP66	R\$ 52,19
06	01	Caixa de passagem hermética IP65	R\$ 58,00
07	02	Carregadores portáteis de 20000mAh	R\$ 268,50
08	01	Bateria de lítio de 8800mAh	R\$ 38,80
Total			R\$ 641,53



A



B



C



D



E



F



G



H

Figura 26. Etapas da montagem do sensor e da placa TTGO T-Call - (A) Sensor MPU6050 e bateria reserva fixados na caixa de junção; (B) Placa de desenvolvimento TTGO T-Call; (C) Placa de desenvolvimento, sensor, bateria e antena acondicionados na caixa; (D) Caixa de junção fechada com antena do modem fixada na parte frontal; (E) Carregador portátil para alimentação principal; (F) Caixa de passagem hermética IP65; (G) Dispositivo IoT , carregador portátil montados na caixa hermética; (H) Testes do dispositivo IoT em bancada.
Fonte: Autoria própria

3.2 Desenvolvimento do código fonte do TTGO T-Call ESP32

O software Arduino IDE é um software gratuito, disponível para download em <https://www.arduino.cc/en/software>, esse software permite a programação através de comandos em linguagem C++, de todos os modelos de placas de desenvolvimento baseadas em Arduino, inclusive do TTGO T-Call ESP32.

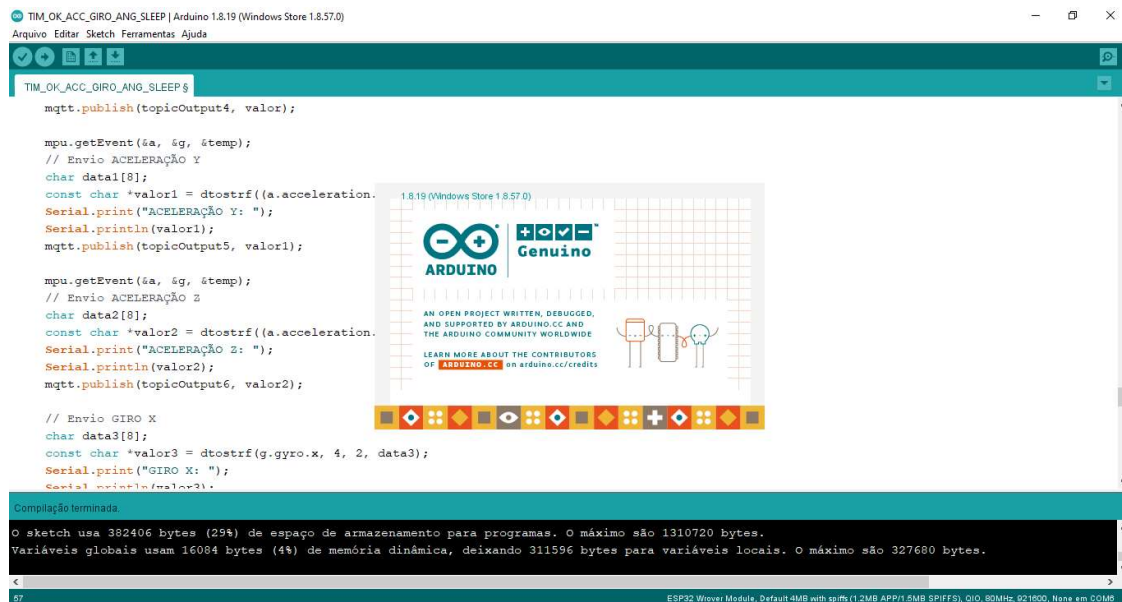
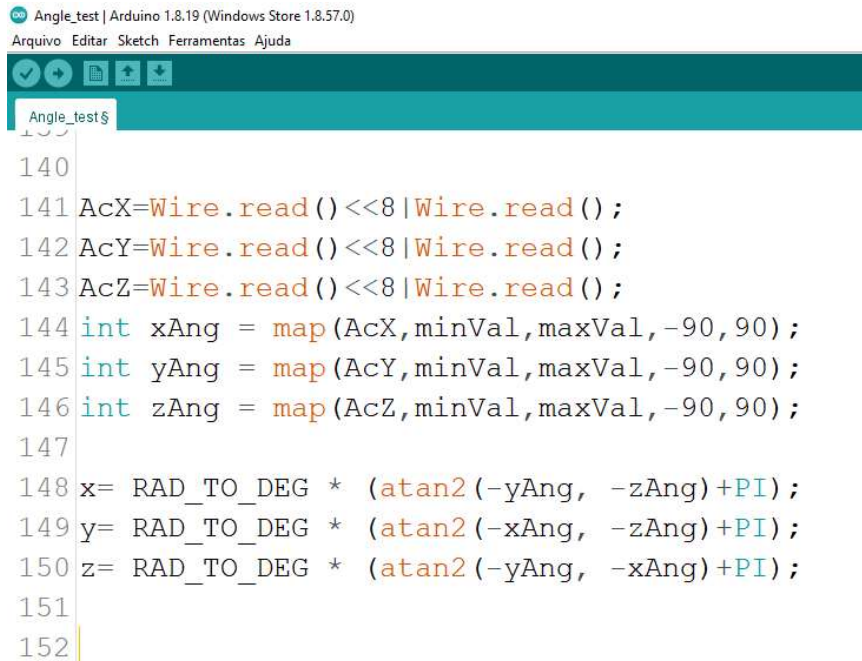


Figura 27. Software Arduino IDE
Fonte: Autoria própria

3.2.1 Código fonte do dispositivo IoT

Para medir a inclinação dos ângulos dos eixos do sensor, é necessário coletar os valores dos registradores ADC dos acelerômetros do MPU6050 e realizar cálculos utilizando a placa de desenvolvimento TTGO T-Call ESP32. No trecho do código fonte exibido na Figura 28, a extração dos valores dos ADCs dos acelerômetros é feita utilizando a função *Wire.read()* e a função *Map()* é utilizada para converter os valores dos ADCs em ângulos. Entretanto essa conversão é realizada de maneira uniaxial, limitando a leitura da inclinação em $\pm 90^\circ$, em relação ao centro de gravidade do sensor.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. At the top, the title bar reads "Angle_test | Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)". Below the title bar is a menu bar with "Arquivo", "Editar", "Sketch", "Ferramentas", and "Ajuda". A toolbar with icons for saving, running, and other functions is visible. The main text area shows a C++ sketch for "Angle_test". The code includes several lines for reading sensor data and calculating angles. Lines 141-143 read raw sensor data into AcX, AcY, and AcZ. Lines 144-146 use the map() function to scale these values into angles xAng, yAng, and zAng ranging from -90 to 90. Lines 148-150 use atan2() to calculate the angles in radians, adding PI to the result, and then convert them to degrees using the RAD_TO_DEG constant. The code ends at line 152.

```
140
141 AcX=Wire.read()<<8|Wire.read();
142 AcY=Wire.read()<<8|Wire.read();
143 AcZ=Wire.read()<<8|Wire.read();
144 int xAng = map(AcX,minVal,maxVal,-90,90);
145 int yAng = map(AcY,minVal,maxVal,-90,90);
146 int zAng = map(AcZ,minVal,maxVal,-90,90);
147
148 x= RAD_TO_DEG * (atan2(-yAng, -zAng)+PI);
149 y= RAD_TO_DEG * (atan2(-xAng, -zAng)+PI);
150 z= RAD_TO_DEG * (atan2(-yAng, -xAng)+PI);
151
152
```

Figura 28. Funções de cálculo dos ângulos dos eixos do sensor
Fonte: Autoria própria

A função atan2() (tangente inversa), utilizou os valores obtidos na função map () para calcular a inclinação dos ângulos dos eixos do sensor MPU6050, o resultado dessa função é somado ao valor de Pi e é expresso em radianos, sendo necessária à sua conversão através da função RAD_TO_DEG, para expressar os valores das inclinações dos ângulos dos eixos em um range de 0° à 360°.

A programação da placa de desenvolvimento foi realizada de acordo com o fluxograma exibido na Figura 29.

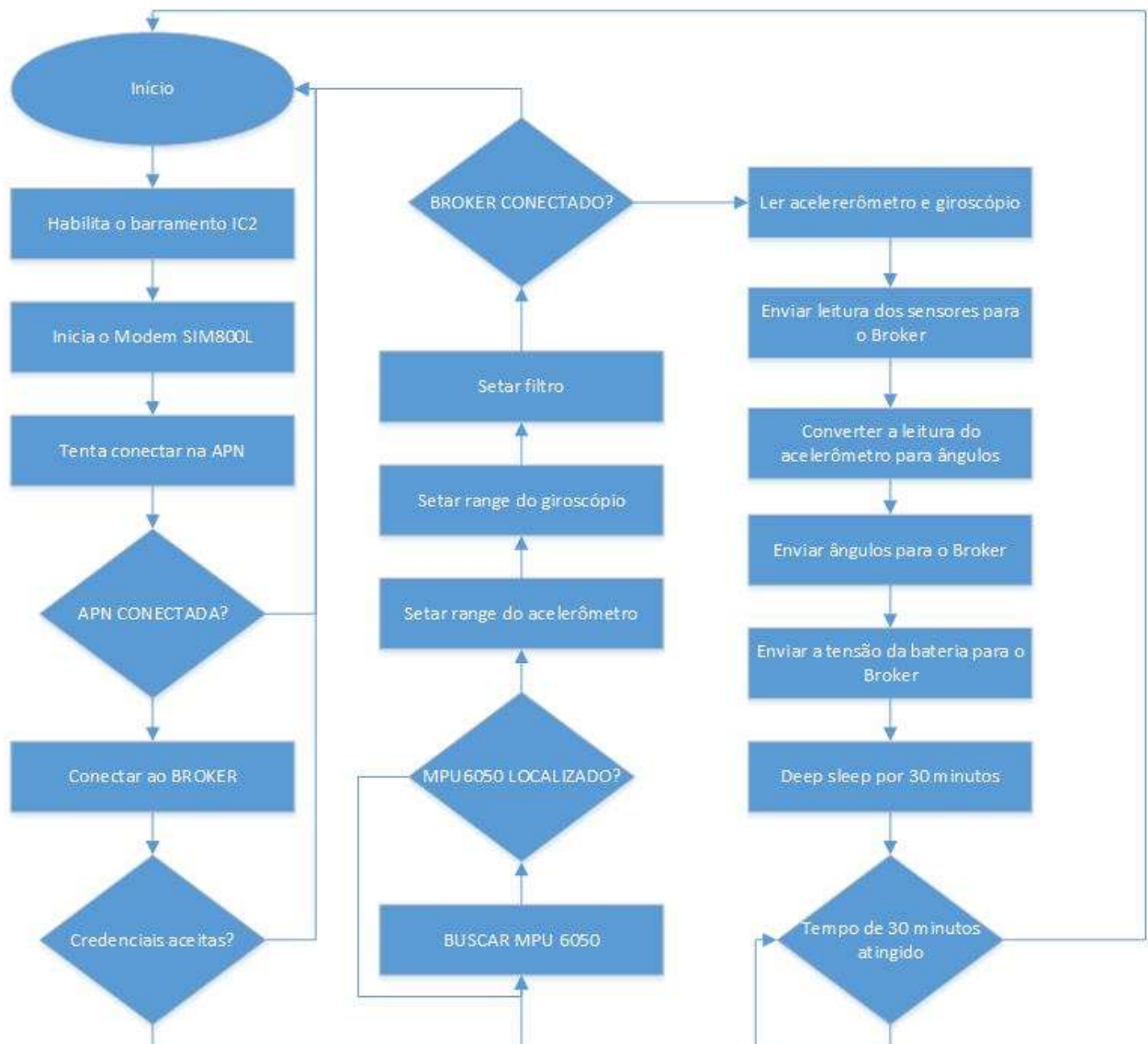


Figura 29. Fluxograma da lógica desenvolvida para o TTGO T-Call
Fonte: Autoria própria

3.3 Desenvolvimento da interface web e do banco de dados

Para realizar o armazenamento e a visualização dos dados coletados pelo sensor MPU6050 e enviados para a internet através do TTGO T-Call, a empresa Grafcet Automação Industrial disponibilizou acesso a um de seus servidores virtuais, hospedado na nuvem da UOL, que possui um banco de dados SQL e o Node-RED.

O Node-RED é uma plataforma low-code criada pela IBM para desenvolvimento de aplicações que utilizam tecnologias tais como hardwares, serviços, protocolos e APIs compatíveis com IoT (do inglês Internet of Things). A programação da aplicação é feita em páginas denominadas “Flows” e as bibliotecas de funções podem ser importadas para aumentar

as possibilidades de manipulação dos dados. A manipulação de dados no Node-RED é feita através de funções chamadas nós.

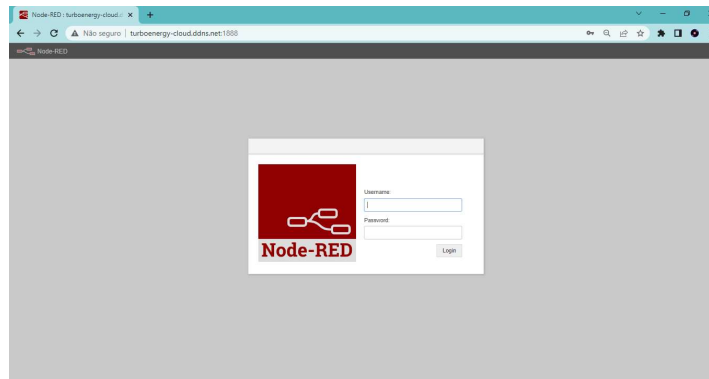


Figura 30. Tela de login para a interface de desenvolvimento do Node-RED
Fonte: Autoria própria

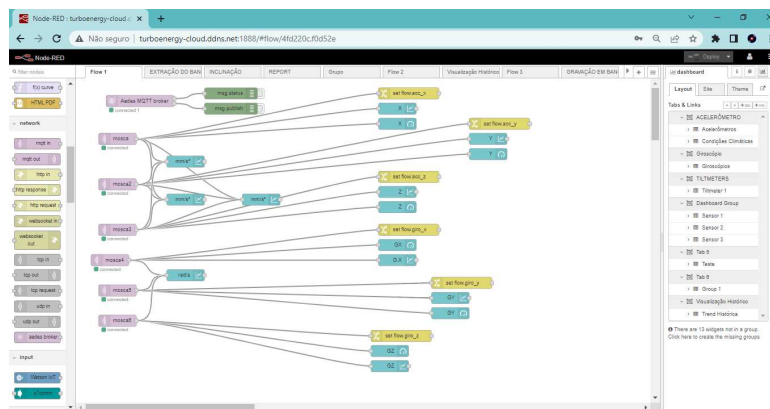


Figura 31. Flow desenvolvido no Node-RED
Fonte: Autoria própria

O envio dos dados coletados pela placa desenvolvimento TTGO T-Call ESP32, é feito através do protocolo MQTT e para que sejam recebidas no servidor na nuvem foi necessário configurar um Broker MQTT na aplicação do Node-RED.

O nó *aedes broker*, disponível na biblioteca *network* do Node-RED, foi configurado para abrir um canal de comunicação, usando a porta 1900. Para que as mensagens sejam aceitas pelo broker é necessário que dispositivo IoT realize uma autenticação de segurança, na qual ele deve enviar um username e o password ao tentar conectar-se ao broker, tal como configurado na aba Security. A Figura 32 exibe a configuração do MQTT Broker no Node-RED, onde a porta 1900 será utilizada para recebimento dos dados enviados pelo TTGO T-Call, sendo necessário que ele ao se conectar realize uma autenticação através de um Username e Password.

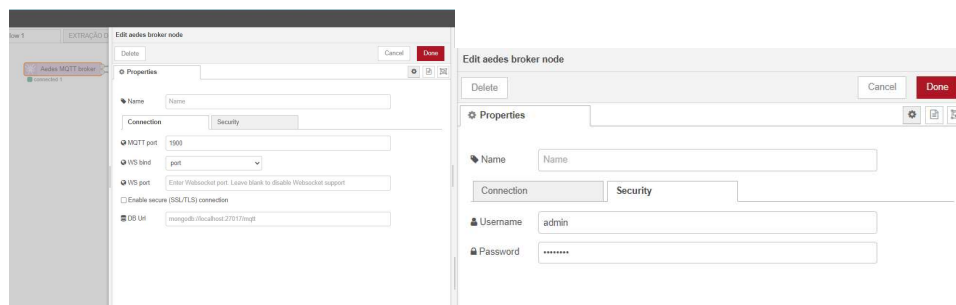


Figura 32. Configuração nó aedes broker
Fonte: Autoria própria

As mensagens transmitidas pelo TTGO T-Call ESP32, que chegam ao Node-RED instalado no servidor na nuvem da UOL, através da porta do MQTT Broker, precisam ser destinadas para seus respectivos tópicos e para tal é necessário utilizar os nós MQTT in, também disponíveis na biblioteca network do Node-RED. As Figuras 33 e 34 mostram a configuração dos tópicos MQTT tanto para a placa de desenvolvimento quanto para a função no Node-RED.

```

TIM_OK_ACC_GIRO_ANG_SLEEP | Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
Verificar
TIM_OK_ACC_GIRO_ANG_SLEEP $
24 // MQTT
25 const char* broker = "turboenergy-cloud.ddns.net";
26 const char* mqttUsername = "admin"; // MQTT username
27 const char* mqttPassword = "admin"; // MQTT password
28
29 const char* topicOutput1 = "mosca1";
30 const char* topicOutput2 = "mosca2";
31 const char* topicOutput3 = "mosca3";
32 const char* topicOutput4 = "mosca";
33 const char* topicOutput5 = "mosca2";
34 const char* topicOutput6 = "mosca3";
35 const char* topicOutput7 = "mosca4";
36 const char* topicOutput8 = "mosca5";
37 const char* topicOutput9 = "mosca6";
38 const char* topicOutput10 = "mosca7";
39 const char* topicOutput11 = "mosca8";
40 const char* topicOutput12 = "mosca9";
41 const char* topicBatt = "mosca10";
Compilação terminada.

```

Figura 33. Criação dos tópicos MQTT feita no Arduino IDE
Fonte: Autoria própria

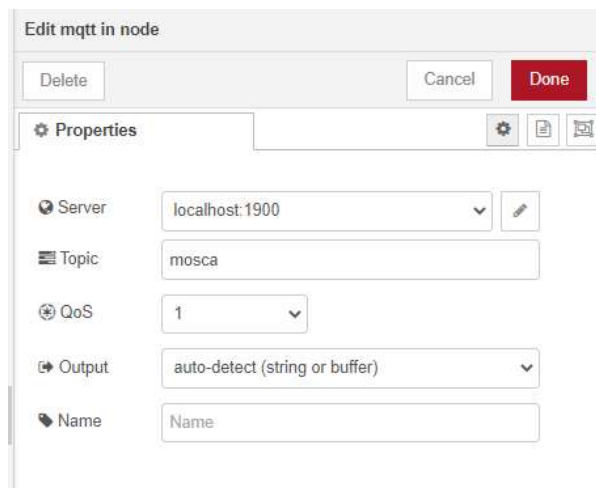


Figura 34. Criação do tópico MQTT no Node-RED
Fonte: Autoria própria

As telas para a visualização dos dados coletados pelo TTGO T-Call ESP 32 através do sensor MPU6050, foram desenvolvidas utilizando os nós disponíveis na biblioteca dashboard. A Figura 35 exibe a conexão entre os nós utilizada na interface de desenvolvimento, para a criação das telas com os dados recebidos nos tópicos MQTT para exibição dos valores do acelerômetro e do giroscópio do sensor MPU6050 enviados pelo TTGO T-Call.

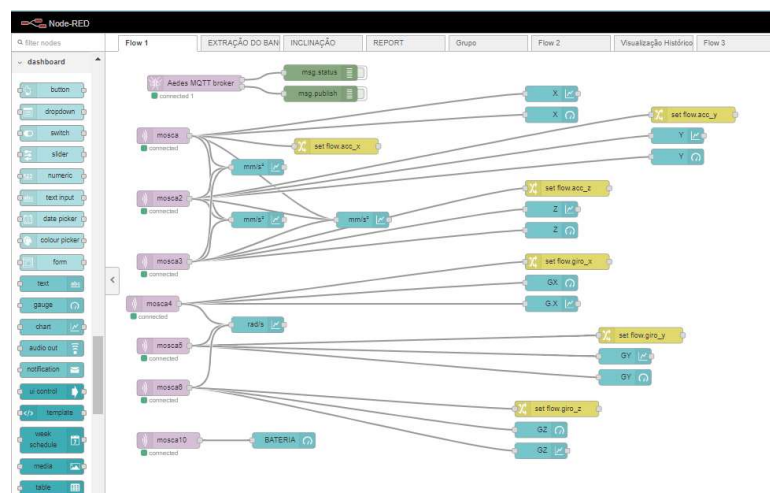


Figura 35. Flow das telas de visualização dos dados recebidos no Node-RED
Fonte: Autoria própria

Como resposta as conexões entre os nós feitas no flow da interface de desenvolvimento do Node-RED, foram geradas as telas exibidas nas Figuras 36 e 37, que permitem a visualização dos dados coletados pelo sensor MPU6050 (aceleração e giro).

O usuário deve utilizar um navegador web (Google Chrome, Safari, Internet Explorer), e acessar o endereço <http://turboenergy-cloud.ddns.net:1888/ui>, para poder visualizar os dados em tempo real e ter acesso ao histórico das variáveis que estão armazenadas no banco de dados.

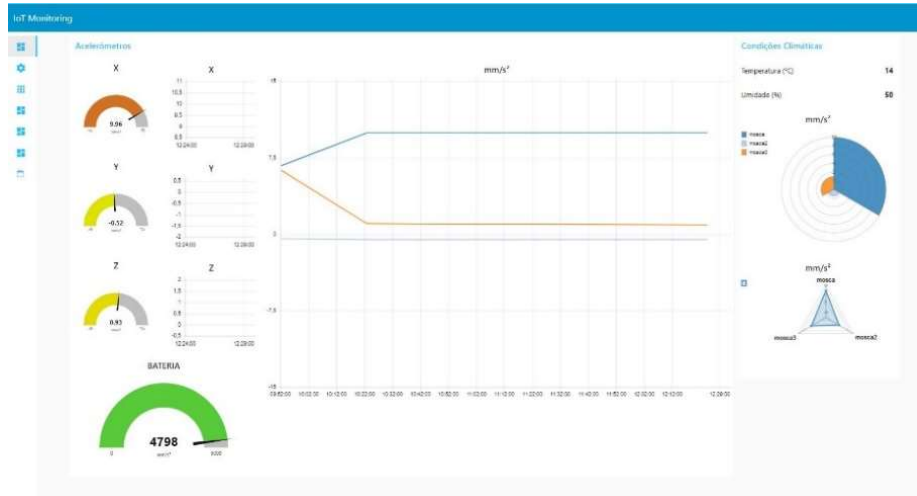


Figura 36. Tela de visualização dos valores do acelerômetro recebidos pelo Node-RED
Fonte: Autoria própria

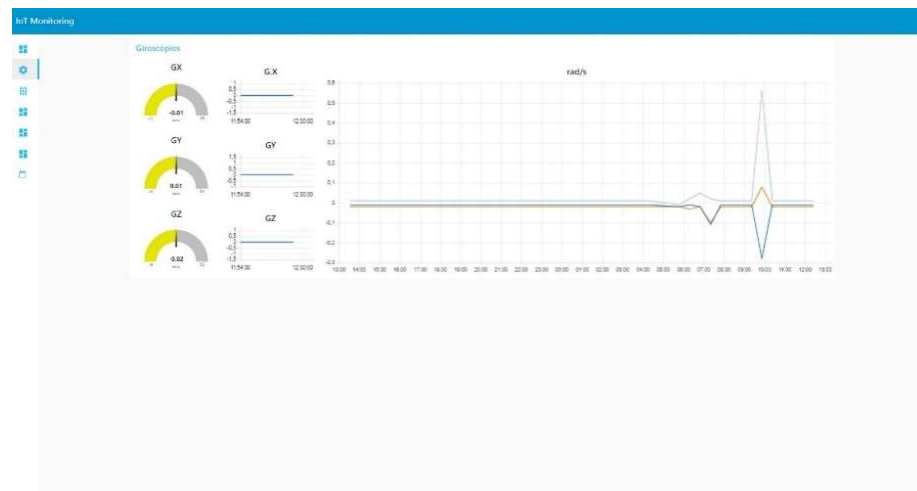


Figura 37. Tela de visualização dos valores do giroscópio recebidos pelo Node-RED
Fonte: Autoria própria

A Figura 38 exibe a conexão entre os nós utilizada na interface de desenvolvimento, para a criação da tela de exibição dos ângulos enviados pelo TTGO T-Call ESP32 e a Figura 39 exibe a tela apresentada em um navegador web.

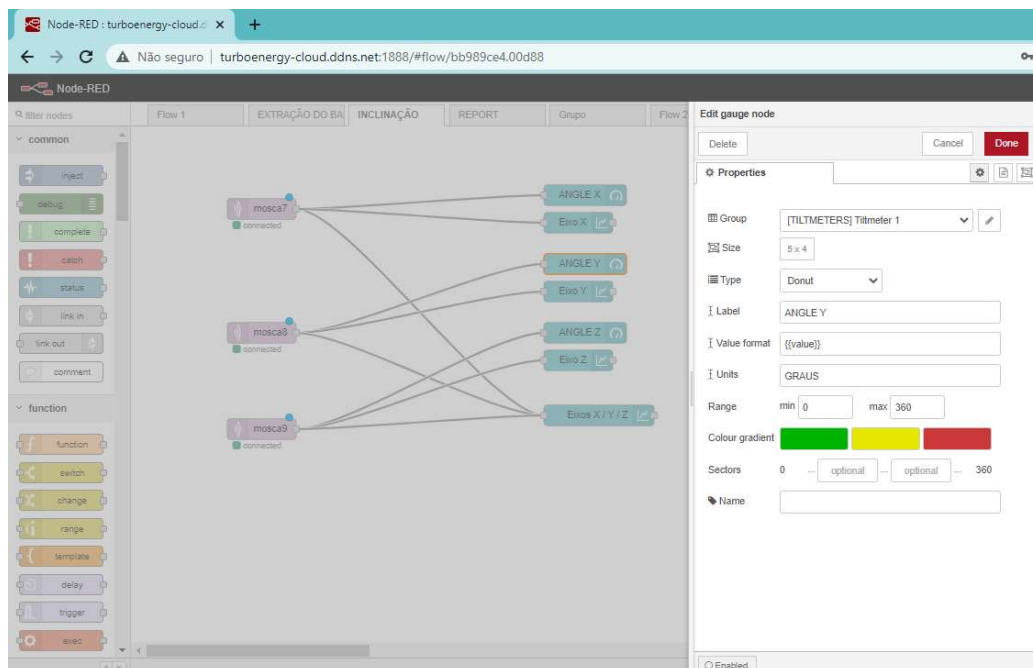


Figura 38. Flow das telas de visualização dos ângulos calculados pelo TTGO T-Call
Fonte: Autoria própria



Figura 39. Tela de visualização ângulos recebidos no Node-RED
Fonte: Autoria própria

Para armazenamento dos dados coletados, de tal forma que fosse possível verificar seus valores em um intervalo conforme a necessidade do usuário, foi necessário criar um banco de dados utilizando o software MySQL Workbench para acessar o servidor. A Figura 40 exibe a configuração da conexão do banco de dados criado para armazenamento dos dados e a Figura

41 exibe a configuração da tabela e a seleção do banco de dados para que o mesmo mostre os valores entre as datas de um período de coleta.

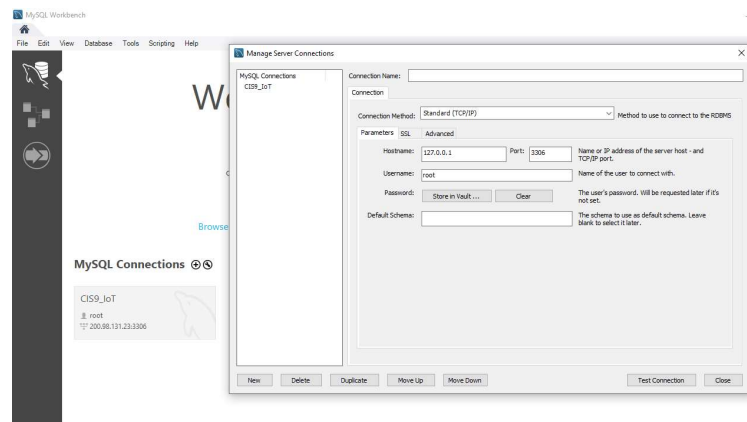


Figura 40. Configuração da conexão ao banco de dados
Fonte: Autoria própria

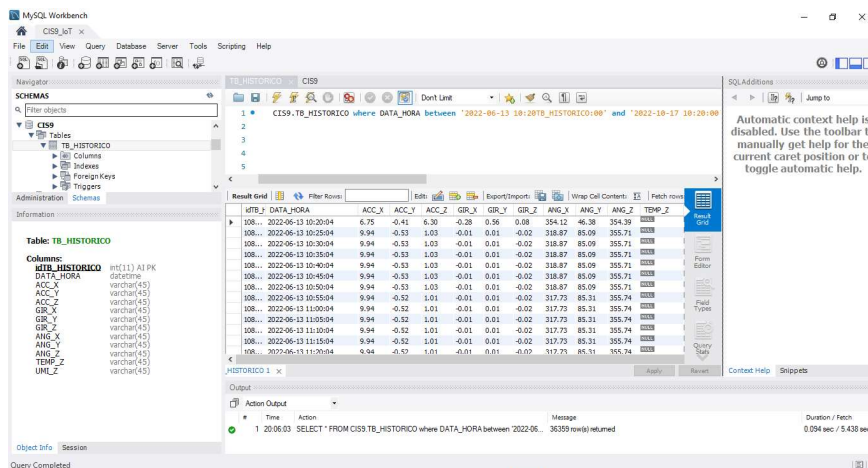


Figura 41. Banco de dados criado e visualização da tabela com o histórico dos dados
Fonte: Autoria própria

Para armazenar os dados coletados pelo dispositivo IoT no banco de dados, foi necessário converter os valores recebidos através dos tópicos *MQTT in*, para os formatos aceitos pelo nó *mysql* disponível na biblioteca *storage* do Node-RED, pois é ele o responsável pela gravação dos dados no banco e essa gravação acontece ciclicamente em um intervalo de 5 minutos.

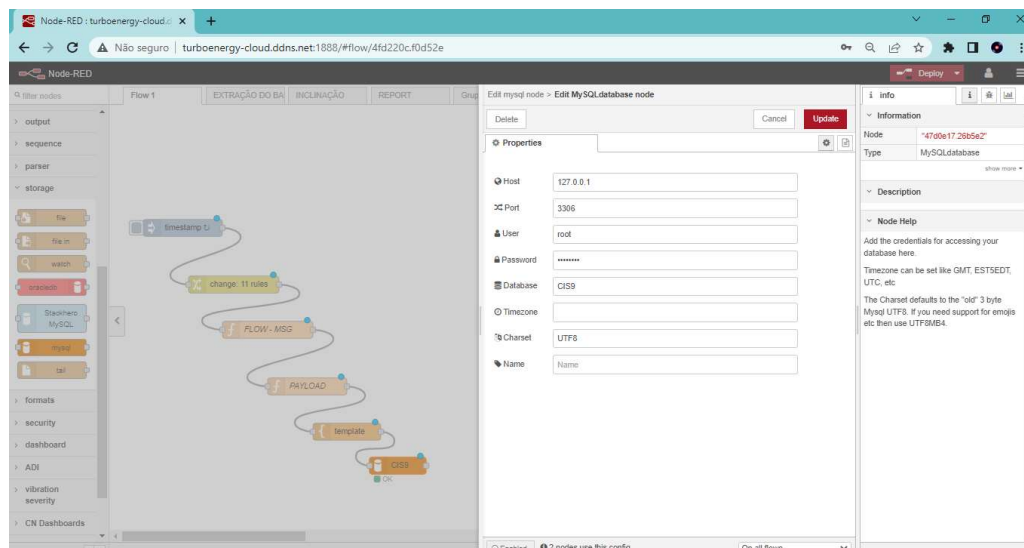


Figura 42. Configuração do nó mysql para gravação no banco de dados
Fonte: Autoria própria

A Figura 43 exibe o flow responsável pela extração das informações do banco de dados, que serão disponibilizadas ao usuário da interface web e a Figura 44 exibe a interface na qual o usuário solicita o histórico da variável.

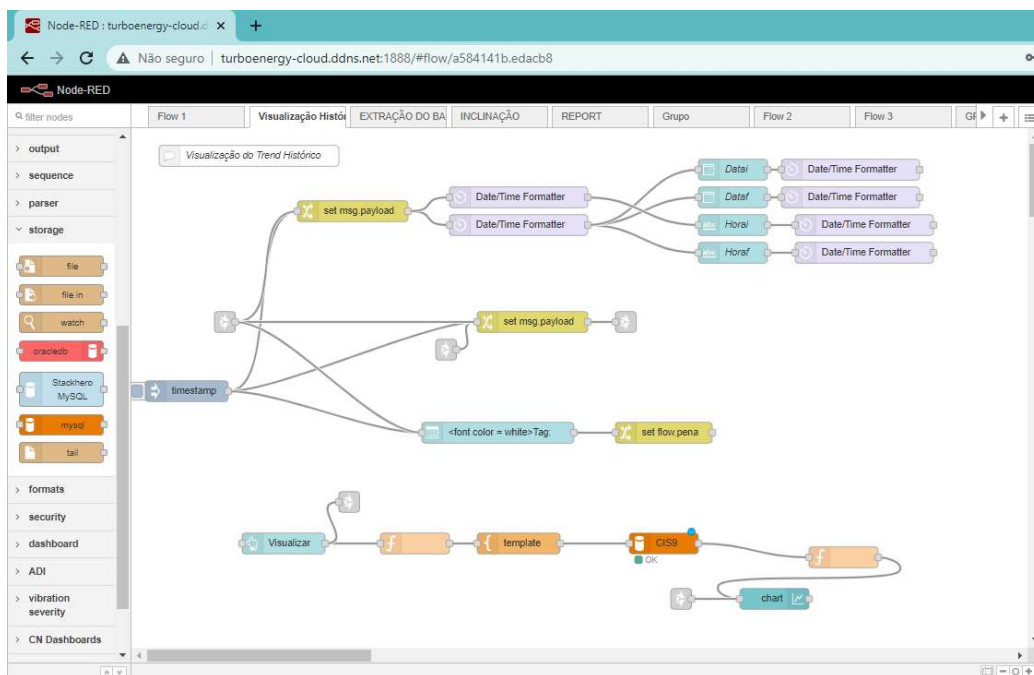


Figura 43. Flow responsável pela extração dos valores armazenados no banco de dados
Fonte: Autoria própria

Não foi permitido ao usuário do sistema, acessar diretamente a base de dados SQL, entretanto criou-se uma aba de consulta, para que a pessoa que tivesse acesso ao sistema

utilizando um navegador web, pudesse selecionar um intervalo entre datas e obtivesse acesso ao histórico da variável desejada.

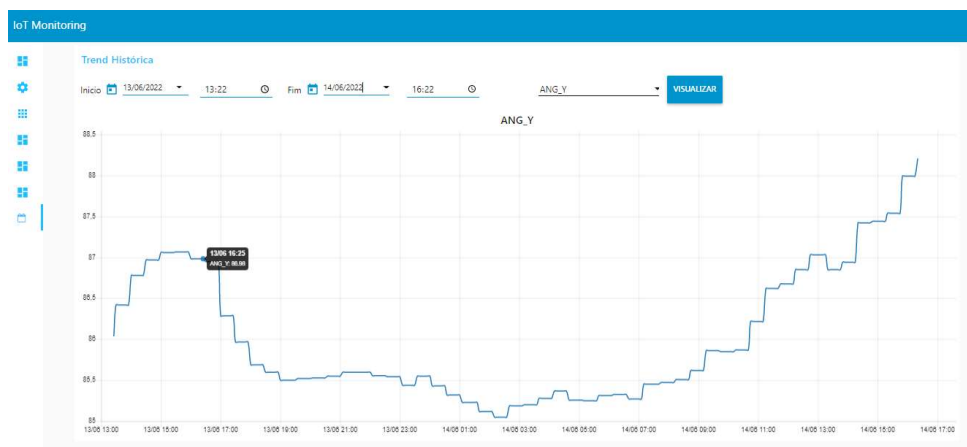


Figura 44. Consulta ao banco de dados feita pela interface web
Fonte: Autoria própria

3.4 Caracterização da obra monitorada e instalação do dispositivo

Durante um período de ocorrência de chuvas intensas, as quais causaram incremento no fluxo do córrego dos Machados, localizado na zona leste de São Paulo, houve o colapso da contenção da margem direita do curso d'água do mesmo.

A contenção da margem do córrego é composta por gabiões tipo caixa. Segundo os moradores locais, o mesmo trecho do córrego já havia apresentado ruptura antes. Este foi recuperado, no entanto, voltou a entrar em colapso.

Em frente ao local do sinistro, encontra-se uma galeria de águas pluviais de seção quadrangular de grandes dimensões. Adicionalmente, leito do córrego encontra-se assoreado e notou-se um grande volume de lixo e entulho retido nas contenções

Dentre as possíveis causas do colapso, poder-se aventar a hipótese de erosão das fundações da contenção da margem rompida pelo grande fluxo advindo da galeria, a qual descarrega o fluxo pluvial praticamente de forma direta na contenção rompida. A Figura 45 à 48 apresentam o local onde ocorreu a ruptura da contenção em estudos:



Figura 45. Local de colapso e rachaduras no pavimento devido a movimentação do solo
Fonte: Dados da pesquisa



Figura 46. Vista geral do local e contenção provisória
Fonte: Dados da pesquisa



Figura 47. Detalhe do degrau hidráulico em frente ao local rompido
Fonte: Dados da pesquisa



Figura 48. Galeria de águas pluviais situada em frente ao local rompido
Fonte: Dados da pesquisa

A contenção utilizada nas margens no córrego dos Machados já era composta por gabiões tipo caixa e para que não fossem introduzidos elementos com comportamentos mecânicos diferentes em relação a contenção existente, optou-se por continuar utilizando a mesma solução de contenção na recuperação da margem colapsada. O revestimento do fundo do curso d'água do córrego no trecho recuperado, foi feito com gabiões tipo colchão. A seguir é apresentada uma seção típica da solução em contenção projetada:

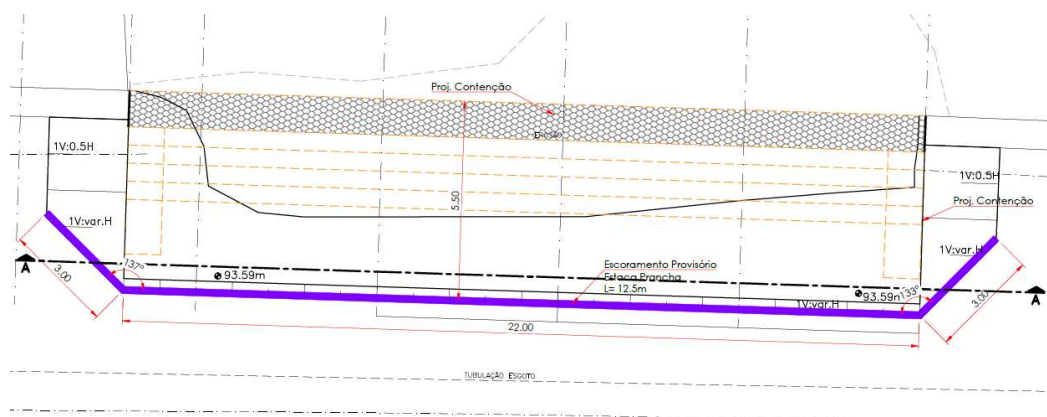


Figura 49. Vista superior da implantação da contenção provisória e da contenção de gabião
Fonte: Dados da pesquisa

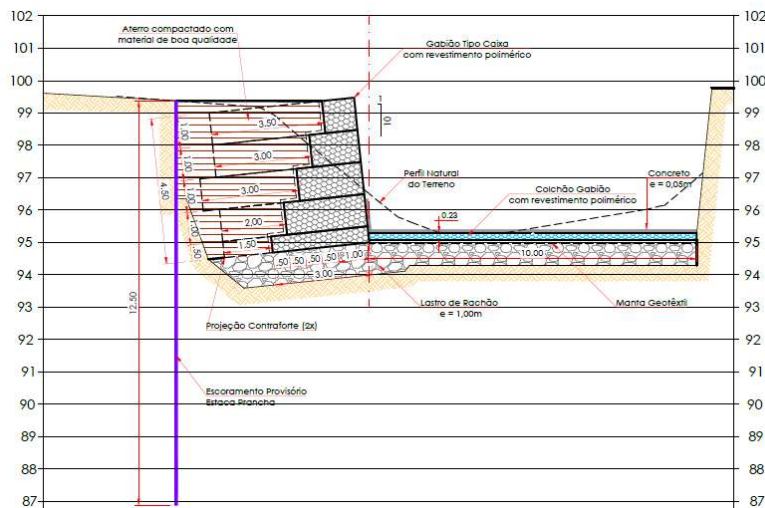


Figura 50. Seção típica da solução projetada
Fonte: Dados da pesquisa

4.1 Instalação do dispositivo IoT na contenção em gabião caixa

Durante a execução da obra, colocou-se uma placa de MDF de 50cm x 1,5cm x 50cm (C x L x A), dentro de uma das gaiolas da contenção, localizada na última fiada desta, de modo que essa placa ficou posicionada entre as pedras e a malha na face da contenção, servindo de base para a instalação do dispositivo IoT. O dispositivo desenvolvido foi posicionado no centro da caixa hermética IP65, que por sua vez foi fixada no centro da placa de MDF, de tal forma que caso houvesse movimentações na placa de MDF a mesma fosse transmitida para a caixa contendo equipamento.

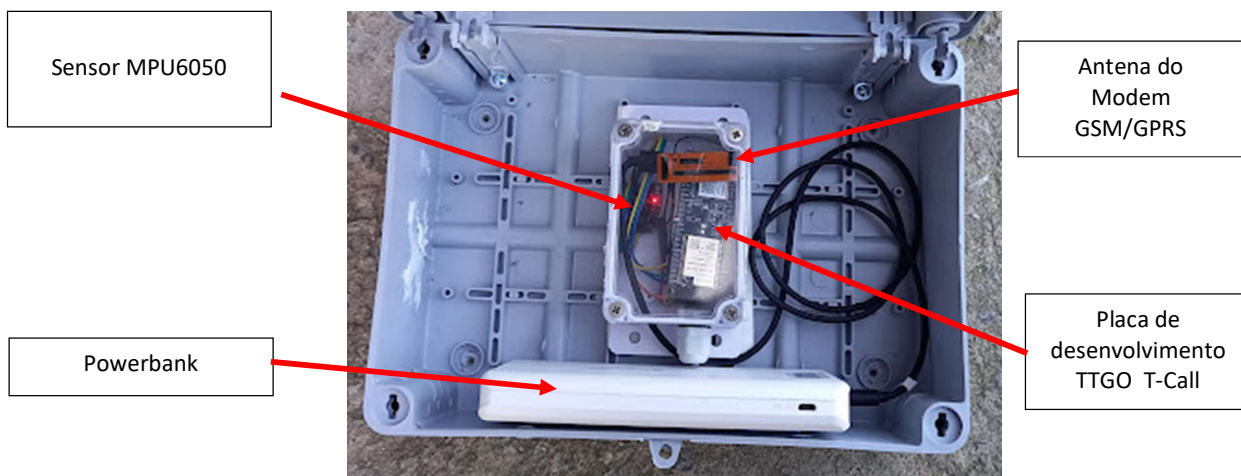


Figura 51. Componentes do dispositivo IoT dentro da caixa de proteção
Fonte: Autoria própria

O local da instalação da caixa contendo o IoT foi escolhido devido ao fato que as possíveis instabilidades, tais como a ruptura global, a ruptura da fundação, o deslizamento, o tombamento e a ruptura interna seriam sentidos com mais intensidade nesse ponto, todas essas instabilidades influenciarão diretamente na inclinação da face do paramento externo da estrutura. As Figuras a seguir exibem a instalação da caixa contendo o dispositivo na contenção:



Figura 52. Execução da amarração das gaiolas
Fonte: Autoria própria



Figura 53. Posicionamento da placa de MDF entre a malha e as pedras
Fonte: Autoria própria



Figura 54. Dispositivo IoT instalado na contenção
Fonte: Autoria própria

4 Resultados e discussões

O monitoramento remoto da inclinação da contenção em gabião caixa foi realizado na fase de execução da obra, durante um período de 89 dias consecutivos, iniciando no dia 13 de junho e encerrando no dia 09 de setembro de 2022. O dispositivo foi configurado para realizar a leitura dos giroscópios e acelerômetros do sensor MPU6050, calcular os ângulos de inclinação dos eixos x, y e z, transmitindo essas variáveis em intervalos de 30 minutos para o servidor em nuvem, resultando em total de mais de duas mil leituras, durante o período monitoramento da estrutura.

Devido a forma como o MPU6050 foi posicionado dentro da caixa, os resultados aqui apresentados serão os valores da variação do ângulo de inclinação do eixo y do sensor, cujo valores possibilitam indicar movimentos de instabilidade, que influenciariam na inclinação da face da estrutura.

Para fins de análise e discussões sobre os resultados coletados pelo dispositivo IoT, optou-se por exportar as leituras da variável ANG_Y, armazenadas no banco de dados SQL, para uma planilha eletrônica (Microsoft Excel), afim de criar representações gráficas para melhor visualização e compreensão da variação da inclinação, que também é influenciada pelas vibrações captadas pelo sensor de aceleração da placa MPU6050, sendo assim os valores apresentados nos gráficos apresentam a variação média da inclinação em função do período de monitoramento da estrutura. A Figura 55 exibe o gráfico da variação da inclinação durante todo período da coleta realizada pelo dispositivo IoT, visto a partir da interface web e a Figura 56 exibe o gráfico tratado a partir do Excel para exibição da inclinação média com a mesma escala do gráfico da interface web.

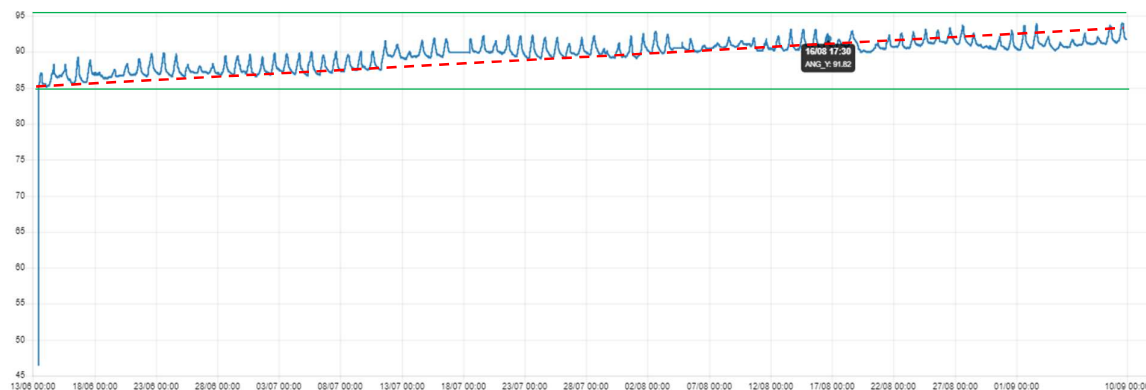


Figura 55. Histórico da variação da inclinação visualizado através da interface web
Fonte: Autoria própria

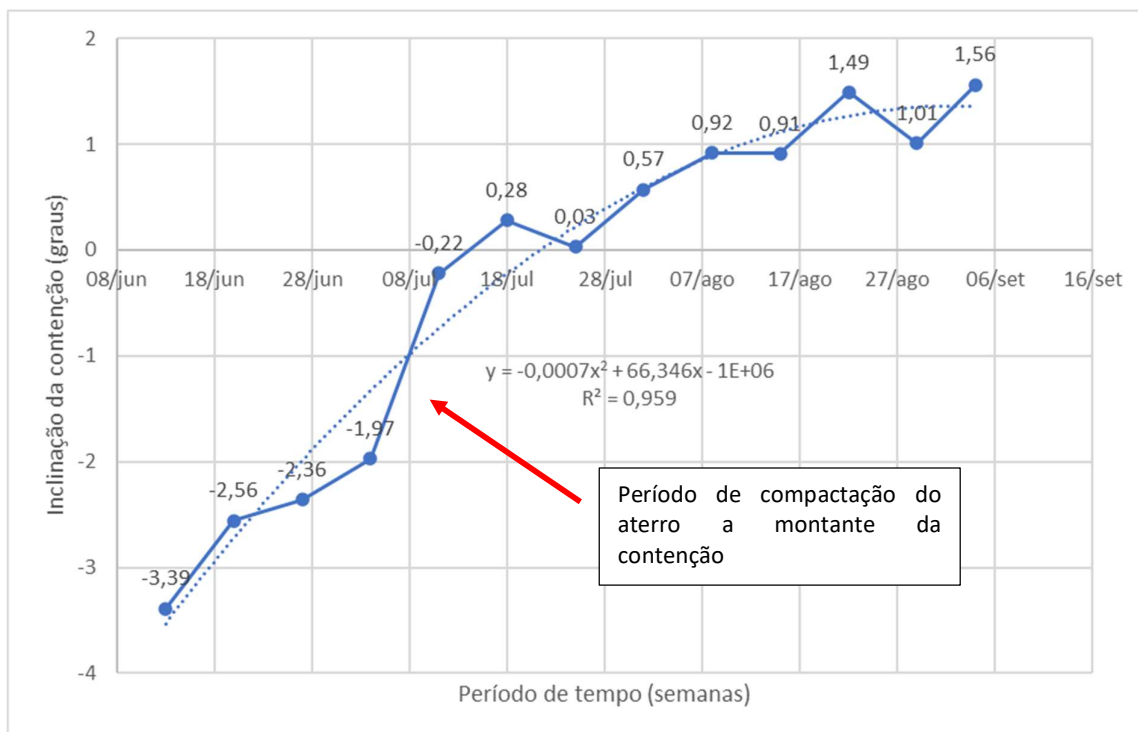


Figura 56. Histórico da inclinação visualizado em planilha eletrônica
 Fonte: Autoria própria

Observando-se a Figura 56, pode-se verificar que durante a execução da contenção o sensor indicou variações em seu prumo, indicadas por uma correlação binomial bem ajustada, ou seja, valor de R^2 de 0,95. Tal coeficiente também indica a baixa variação em relação as leituras feitas pelo sensor, comprovando o bom funcionamento deste durante o período de acompanhamento.

A Figura 57 ilustra que a variação da inclinação média da contenção durante o período de monitoramento foi de 4,95°, iniciando em 86,61° (-3,39°) até 91,56° (+1,56°), no local instrumentado.

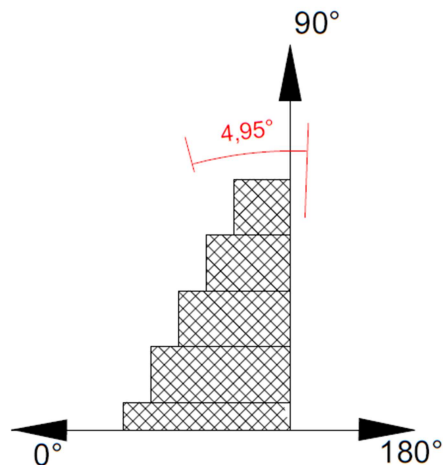


Figura 57. Vista em corte da contenção e variação da inclinação média durante o período de monitoramento (sem escala)
Fonte: Autoria própria

As variações das leituras podem ser correlacionadas a períodos específicos da obra. A maiores variações de inclinação ocorreram entre as semanas de 11 de junho e 18 de julho, período este no qual a compactação do aterro de montante da contenção estava sendo executada. Neste intervalo de tempo houve uma variação angular de 4%. A partir do final da compactação, até o término das leituras, a variação angular foi de 1,4%. A seguir é apresentada a análise estatística das inclinações mensuradas:

Tabela 9 - Análise estatística das leituras obtidas

Média	89,71°
Limite inferior da média (95% de confiança)	88,69°
Limite superior da média (95% de confiança)	90,73°
Mediana	90,28°
Desvio Padrão	1,67°
Máximo	91,56°
Mínimo	86,61°
Coefficiente de variação	1,8%

Para a interpretação da média das leituras obtida, no intuito de verificar se esta é significativa em relação a desejada para a contenção (90°), o que indicaria o prumo desta (inclinação=0), foi realizado teste T nas médias das leituras apresentadas na Figura 56. Para tal foram consideradas as seguintes hipóteses:

- H_0 = leitura média igual a 90° ($p > 0,05$);
- H_0 = leitura média diferente de 90° ($p < 0,05$).

A Tabela a seguir apresenta a análise conduzida:

Tabela 10 - Análise estatística das leituras médias obtidas por meio de teste T

Média	89,71°
Valor de referência	90°
Distribuição normal	ok
Valor de p	0,55

Dessa forma, com base na Tabela 10 apresentada, pode-se constatar que o valor de p é superior a 0,05, o que indica a validade da hipótese H_0 , ou seja, a média não se diferencia estatisticamente do valor de referência de 90° . Assim, verifica-se que, apesar de durante sua etapa construtiva a contenção ter apresentado variações de inclinação (indicadas pelo sensor) estas não são estatisticamente significativas a ponto de consistirem em desaprumo da contenção.

Os valores dos ângulos de inclinação dos eixos X e Z, também foram armazenados em banco de dados e exportados para uma planilha eletrônica, entretanto, não foram realizadas análises estatísticas dos valores dos mesmos, pois somente os valores da inclinação do eixo Y representava a inclinação da face do muro de contenção.

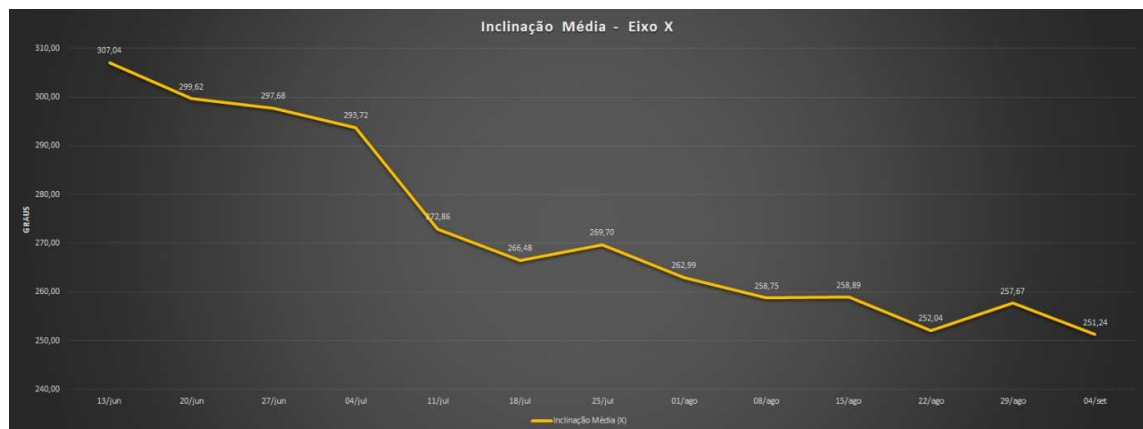


Figura 58. Histórico da variação da inclinação do eixo X
Fonte: Autoria própria

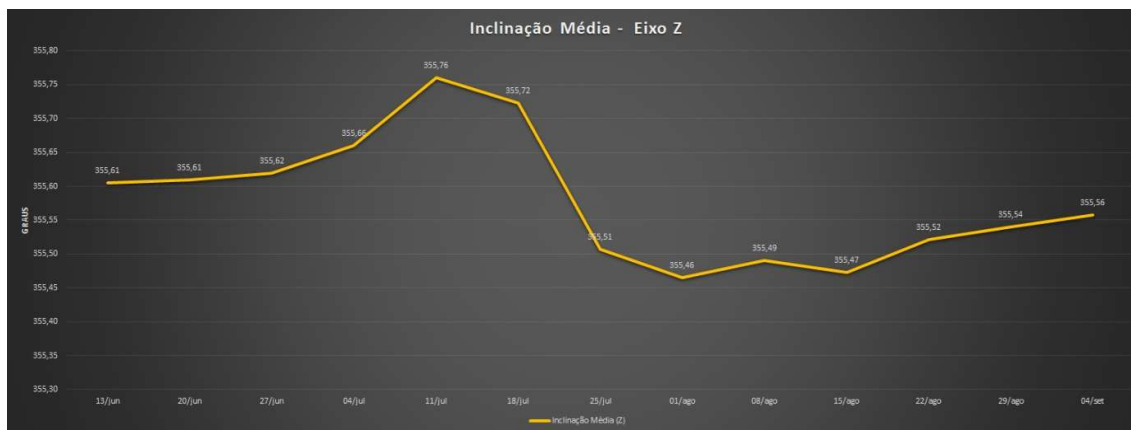


Figura 59. Histórico da variação da inclinação do eixo Z
Fonte: Autoria própria

Verificou-se que durante o período de monitoramento da obra, os valores do ângulo do eixo Z foram estáveis, entretanto houve uma grande alteração dos valores do ângulo de inclinação do eixo X, que variou $55,8^\circ$ durante o período de coleta. Devido a essa grande variação, optou-se por analisar o comportamento do dispositivo, através de simulações em bancada dos valores dos ângulos calculados, em relação a posição de montagem do sensor dentro da caixa, iniciando a análise dos valores pela posição que o sensor foi instalado em campo e para mais duas posições de referência (eixo x e z).

Tabela 11 – Posição de montagem eixo Y– Valores Obtidos

Ângulos de inclinação dos eixos		
Ang X (°)	Ang Y (°)	Ang Z (°)
343,82	84,63	358,44
308,88	88,89	358,63
260,59	90,50	356,99
250,79	91,22	356,49
229,63	91,27	358,51
225,88	91,36	358,60
235,51	91,47	357,87
233,87	91,53	357,91
205,62	96,23	357,00

Observando a Tabela 11, na posição de montagem eixo Y (a mesma utilizada em campo), verificou-se que os valores obtidos através do eixo X e Z, possuíam um comportamento semelhante ao coletado pelo dispositivo, e que o eixo x apresenta uma grande variação dos seus valores em função de uma pequena variação ao ângulo do eixo da posição de montagem.

Tabela 12 – Posição de montagem eixo X – Valores Obtidos

Ângulos de inclinação dos eixos		
Ang X (°)	Ang Y (°)	Ang Z (°)
90,43	216,81	90,33
91,12	190,07	90,20
92,25	183,96	90,16
92,76	175,82	89,80

Na posição de montagem eixo x, é o ângulo y que possui maiores variações dos seus valores em função da pequena variação do ângulo do eixo da posição de montagem do sensor.

Tabela 13 – Posição de montagem ângulo Z– Valores Obtidos

Ângulos de inclinação dos eixos		
Ang X (°)	Ang Y (°)	Ang Z (°)
96,25	161,60	87,91
96,23	161,86	87,95
96,64	188,33	90,98
96,70	189,52	91,13
96,89	192,40	91,52
97,00	193,33	91,67

Na posição de montagem eixo Z, são os resultados obtidos para o ângulo Y que possuem maiores variações em função da pequena variação do ângulo do eixo Z (posição de montagem do sensor). Atribui-se a esse comportamento o fato do acelerômetro, utilizar o vetor gravidade como referência para realizar o cálculo individual dos ângulos de cada um dos eixos do sensor, antes de executar o cálculo do ângulo em 360°. A função `map()` utilizada no código fonte do dispositivo realiza essa função e por se tratar de uma conversão uniaxial, a mesma está mais susceptível a variações, onde qualquer rotação sobre os outros eixos reduz a magnitude da aceleração no eixo convertido.

5 Conclusões

O dispositivo IoT foi capaz de calcular a inclinação do muro de contenção em gabião caixa, usando como referências os valores medidos pelo acelerômetro do MPU6050. Os valores da inclinação foram transferidos através do modem GSM/GPRS da placa de desenvolvimento TTGO- TCall ESP32, utilizando o protocolo de comunicação MQTT que enviou os dados através da internet para o Node-RED instalado em um servidor virtual, hospedado no Uol Cloud Server.

Através dos recursos de programação disponíveis no Node-RED, foi possível estabelecer a comunicação com o banco de dados SQL instalado no servidor virtual e armazenar o histórico da variação da inclinação durante todo período de coleta.

Os dashboards desenvolvidos, permitiram que usuários com acesso ao link da aplicação, pudessem visualizar o valor da última leitura da inclinação e também buscar o histórico da variável armazenado utilizando um navegador web.

Em relação a variação da inclinação do muro de contenção, baseando-se na análise do histórico do comportamento da variável, verificou-se que os valores médios, mínimos e máximos da inclinação, possuem um aumento em função do tempo, existindo uma diferença de $4,95^\circ$ da inclinação média, entre a primeira e a última semana de coleta. Atribui-se o aumento do valor da inclinação, durante o período de coleta, às atividades de aterramento, compactação e pavimentação, que foram realizadas no maciço contido e que tiveram a utilização de ferramentas e maquinários pesados, que influenciaram na mudança dos valores da aceleração medida pelo sensor MPU6050, pois quando as atividades estavam concentradas em outras áreas da obra, como quando foi realizada a execução do colchão de gabião no córrego, a variação da inclinação foi praticamente nula ($0,25^\circ$). Entretanto, após a execução da pavimentação que foi a última intervenção no maciço contido, houve um aumento de $0,89^\circ$. Após a reabertura da via o valor máximo da inclinação foi de $91,56^\circ$, uma variação de $0,64^\circ$ em relação a inclinação medida durante a execução da pavimentação.

As análises estatísticas dos valores do ângulo de inclinação do eixo Y, indicaram um bom funcionamento do equipamento, já que a correlação binomial calculada foi de 0,95, indicando uma baixa variação em relação as leituras feitas. As variações angulares indicaram que as variações da inclinação medidas pelo dispositivo foram maiores no período de execução de aterro e compactação do montante da contenção. Através da realização do teste T verificou-se que apesar das variações das inclinações, as mesmas não são significativas a ponto de considerarmos um desaprumo da contenção.

Verificou-se uma desvantagem ao utilizar o modem GSM/GPRS, como o método de transmissão wireless do dispositivo IoT, que foi o alto consumo de energia, quando o mesmo realizava transmissão de dados, sendo necessário substituir o power bank de 20.000mAh em intervalos médios de 15 dias antes que a bateria reserva acabasse.

Para futuros trabalhos de monitoramento de estruturas que utilizem sensores de aceleração, sugere-se o posicionamento do acelerômetro triaxial e a calibração de um ponto de referência, de tal forma a realizar as análises de deslocamentos horizontais da estrutura em relação aos eixos X e Z do sensor. Adicionalmente, sugere-se que futuros trabalhos utilizando IoT, façam uso de métodos de transmissão de baixo consumo de energia como LoRa, ZigBee e Bluetooth e incorporem em seus dispositivos mais sensores (strain gages, sensores de temperatura, etc.), o que aumentaria o número de possibilidades de análises do comportamento da estrutura monitorada.

O equipamento desenvolvido é um exemplo da aplicação da tecnologia IoT na construção civil, pois um fenômeno real foi monitorado, e seus dados foram disponibilizados em um servidor na nuvem que serviu de interface para monitoramento e análise do comportamento da variável coletada, criando assim uma solução ciberfísica, que é a principal função da Internet das Coisas.

Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- Adamassu,K.A., Lynch, P.J., Athanasopoulos-Zekkos,A., Zekkos,D.(2019). Long-term wireless monitoring solution for the risk management of highway retaining walls, Proc. SPIE 10971, Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XIII, 1097103 (1 April 2019). doi: 10.1117/12.2516081.
- Ahad, M. A., Paiva, S., Tripathi, G., & Feroz, N. (2020). Enabling technologies and sustainable smart cities. *Sustainable cities and society*, 61, 102301.
- Ahmad, N., & Mehmood, R. (2020). Enterprise systems for networked smart cities. In *Smart infrastructure and applications* (pp. 1-33). Springer, Cham.
- Alavi, A.H., Jiao, P., Buttlar, W.G., Lajnef, N. (2018). Internet of Things-Enabled Smart Cities: State-of-the-Art and Future Trends. *Mesurement*. doi: 10.1016/j.measurement.2018.07.067
- Araújo, Ciro José Ribeiro Villela. Principais aspectos abordados na ABNT NBR 9452:2016, a importância das atividades de manutenção em pontes e viadutos e as dificuldades das condições de acesso às inspeções. *Revista IPT | Tecnologia e Inovação* v.1, n.5, ago., 2017.
- Artesis, (2021). Concessionária entrega novas obras de estabilização de talude. Disponível em: <<https://www.arteris.com.br/noticias/concessionaria-entrega-novas-obras-de-estabilizacao-de-talude/>> . Acesso em 02.dez.2022
- Balakrishna, C. (2012, September). Enabling technologies for smart city services and applications. In *2012 sixth international conference on next generation mobile applications, services and technologies* (pp. 223-227). IEEE.
- Barducco, A. P. S., & Constâncio, B. M. (2019). Indústria 4.0: tecnologias emergentes no cenário da construção civil e suas aplicabilidades. *Engenharia Civil-Pedra Branca*.
- Barros, P. L. A. (2010). Maccaferri Gabiões do Brasil Ltda - Obras de Contenção, Publicação Técnica.

- Barros, P. L. de A.; Fracassi, G. ; Duran, J. da S.; Teixeira, M. A. Obras de CONTENÇÃO, Manual técnico Maccaferri. São Paulo. 2017.
- Belandi, C.; Da Costa, M. S. Agência de notícias IBGE, 29 nov. 2019. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/26127-estado-do-rio-tem-mais-da-metade-do-territorio-com-alto-risco-de-deslizamentos>>. Acesso em: 03 dez. 2022.
- Benjamin, C.V.S. (2006). Avaliação Experimental de Protótipos de Estruturas de CONTENÇÃO em Solo Reforçado com Geotêxtil – Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Bhuiyan, M. Z. A., Wang, T., Wang, G., Rahman, M.A., Wu, J., Cao, J. (2018). Big Data Reduction for a Smart City's Critical Infrastructural Health Monitoring, in IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 3, pp. 128-133. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700303.
- Brandão, I. A. D. P. (2022). Dispositivo IoT de micromedicação integrado com cloud computing para monitoramento do consumo de água.
- Britto, C. B., & Fiori, A. P. (2021). Estabilidade de taludes rochosos em rodovias: análise da compartimentação estrutural de maciços. Geotecnia, (151), 77-88.
- Castro, L.H.M.(2016) O uso do Arduino e do Processing no Ensino de Física; Rio de Janeiro: UNIRIO / IBIO
- Chen, H-P. (2018) Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures, Editora Wiley BlackWell. Edição 1.
- da Cruz, L. B., & Braghin, M. F. L. (2016). Estudo da utilização da estrutura de contenção tipo Gabião. In Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332 (Vol. 8, No. 4, pp. 33-39).
- Dang, L. M., Piran, M. J., Han, D., Min, K., & Moon, H. (2019). A survey on internet of things and cloud computing for healthcare. Electronics, 8(7), 768.

- Engineering News-Record. Q4 Tech Report: Wearable technology in construction. Disponível em: <<https://www.enr.com/articles/37987-q4-tech-reportwearable-technology-in-construction>> Acesso em: 22 janeiro 2023.
- Farrar, C.R., Worden, K. & Dulieu-Barton, J. (2009) Principles of structural degradation monitoring. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Boller, Chang and Fugino (ed.), John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Ferreira, E.S. (2010). Programa de Cálculo para o Dimensionamento de Estruturas de Solo Reforçado com Geossintéticos – Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, P. M., Machado, M. A., Carvalho, M. S., & Vidal, C. (2022). Embedded Sensors for Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications Review. *Sensors*, 22(21), 8320.
- Filho, M. F. (2014). Internet das Coisas, Universidade do Sul de Santa Catarina.
- Guelzim, T., Obaidat, M. S., & Sadoun, B. (2016). Introduction and overview of key enabling technologies for smart cities and homes. In *Smart cities and homes* (pp. 1-16). Morgan Kaufmann.
- Gerscovich, D., Saramago, R., & Danziger, B. R. (2019). *Contenções: teoria e aplicações em obras*. Oficina de Textos.
- Hoult, N., Bennett, P. J., Stoianov, I., Fidler, P., Maksimović, Č., Middleton, C., & Soga, K. (2009, August). Wireless sensor networks: creating ‘smart infrastructure’. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering* (Vol. 162, No. 3, pp. 136-143). Thomas Telford Ltd.
- i-Micronews (2018). The bright future of MEMS ultrasonic solutions – Interview of Chirp Microsystems, a TDK group company. Disponível em < <https://www.i-micronews.com/the-bright-future-of-mems-ultrasonic-solutions-interview-of-chirp-microsystems-a-tdk-invensense-company/?cn-reloaded=1> > . Acessado em 01 de dezembro de 2022.

- Janchikoski, F. R., Bardelli, G., & Crippa, J. (2022). Otimização Computacional para Desenvolvimento de Projetos Sustentáveis em BIM: Uma Revisão Sistemática de Literatura. *Caderno PAIC*, 23(1), 407-424.
- Jesus, A. A. D., Silva, C. C. S. D., & Caixeta, V. G. S. (2019). Análise do índice de acidentes na engenharia civil: mudanças que a indústria 4.0 vem fazendo nesse índice.
- Kusal, V., Argade, A., Chiplunkar, S., Kumbhar, R., Khode, S.A. (2018). Real Time Bridge Monitoring and Alert Generation System Using IoT. *International Journal Of Advanced Research, Ideas And Innovations In Technology* Volume 3, Issue 5
- Lamonaca, F., Sciammarella, P. F., Scuro, C., Carni, D. L., & Olivito, R. S. (2018). Internet of things for structural health monitoring. In 2018 Workshop on metrology for industry 4.0 and IoT (pp. 95-100). IEEE.
- Liu, H. F., Luo, Z. C., Hu, Z. K., Yang, S. Q., Tu, L. C., Zhou, Z. B., & Kraft, M. (2022). A review of high-performance MEMS sensors for resource exploration and geophysical applications. *Petroleum Science*.
- Lobato, S.L.A., Neto, J. P. R., Amador, S.D.R., Souza, R.M.S., Sampaio, R.A.C. (2009). Análise Modal Experimental e Computacional de uma Ponte Metálica Ferroviária. *Revista Construção Metálica*. Edição 92, p25-28.
- Maccaferri (2021). Gabiões. Disponível em <www.maccaferri.com/br/produtos/gabioes>. Acessado em 04 de dezembro de 2022.
- Marchetti, O. (2008). Muros de arrimo. Editora Blucher.
- Mello, L.D.A. (2020). Análise do Comportamento de uma Escavação em Solo Grampeado. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Centro de Ciências e Tecnologia.
- Miao, Y., Yang, H., Wang, L., & Tong, X (2019). The Development and Field Evaluation of an IoT System of Low-Power Vibration for Bridge Health Monitoring. *Sensors*, 19(5), 1222. doi:10.3390/s19051222.
- Milititsky, J. (2016). Grandes escavações em perímetro urbano. Oficina de Textos.

- Miyasaka, E. L., Fabricio, M. M., & Paoletti, I. (2018). Industry 4.0 and the civil construction in Brazil. In Congresso da Sociedade IberoAmericana de Gráfica Digital, XXII, São Carlos (p. 6).
- Mohanty, S. P., Choppali, U., & Kougianos, E. (2016). Everything you wanted to know about smart cities: The internet of things is the backbone. IEEE Consumer Electronics Magazine, 5(3), 60-70.
- Mouha, R. (2021) Internet of Things (IoT). Journal of Data Analysis and Information Processing, 9, 77-101. doi: 10.4236/jdaip.2021.92006.
- Pedotti, L.A.S. (2019). Dispositivo IoT de Baixo Custo para Diagnóstico de Falhas em Máquinas Rotativas. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação. Universidade Estadual de Campinas.
- Penchala, S.K., Patil, R., Nimbalkar, P., Kamble, D., Muddala, D. (2019). IoT Based Bridge Monitoring System. International Journal of Advanced Research, Ideas an Innovations in Technology. Volume 5, Issue 2
- Piesotronics, (2018). Introduction to MEMS Accelerometers. 2018. Disponível em: <http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/mems-accelerometers>. Acessado em 02 de dezembro de 2022.
- Pinto, S. M. M., & Dorts, I. S. (2020). Dimensionamento de Muro de Arrimo Utilizando Blocos Estruturais como Elementos de Contenção. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE, 6(1).
- Rainieri, C., Lanzano, G., Fabbrocino, G., & Santucci De Magistris, F. (2010). Structural and Seismic Monitoring of Flexible Retaining Walls: opportunities and challenges. In 7TH International Conference on Engineering Computational Technology. Civil-Comp Press.
- Ray, P. P. (2018). A survey on Internet of Things architectures. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 30(3), 291-319.
- Santa, L. D. O. R., Neto, P. P. C., da Silva, F., & Pires, R. C. S. (2022). Estabilidade de Encostas Utilizando Muro de Arrimo de Gabião. Epitaya E-books, 1(15), 29-45.

- Santos Júnior, P. J. (2018). Gabiões e estruturas de arrimo: Análise teórico-numérico-experimental do comportamento mecânico.
- Schwab, K. (2016). The fourth industrial revolution, Editora: Currency EUA
- Segalini, A., Valletta, A., Carri, A., & Cavalca, E. (2019, October). Monitoring of a retaining wall with innovative multi-parameter tools. In Proceedings of the 4th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic—Balkan Region, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (pp. 23-25).
- Silva, J. L. S., Melo, M. C., Camilo, R. S., Galindo, A. L., VIANA, E. C. (2014). Plataforma Arduino integrado ao PLX-DAQ: Análise e aprimoramento de sensores com ênfase no LM35. XIV Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe (ERBASE). Feira de Santana, BA.
- Sinha, S., Shakya, S., Mukhiya, R., Gopal, R., & Pant, B. D. (2014, July). Design and simulation of MEMS differential capacitive accelerometer. In Proceeding of ISSS international conference on smart materials, structures and systems.
- Sony, S., Laventure, S., & Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. Structural Control and Health Monitoring, 26(3), e2321.
- Souza, C. D. F. (2019). A Engenharia Civil no Planejamento e Desenvolvimento da Indústria 4.0.
- Srivastava, P., & Khan, R. (2018). A review paper on cloud computing. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 8(6), 17-20.
- Sun, L., Shang, Z., Xia, Y., Bhowmick, S., & Nagarajaiah, S. (2020). Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection. Journal of Structural Engineering, (5), 04020073.
- Taurion, C. (2009). Cloud computing: computação em nuvem: transformando o mundo da tecnologia da informação. Rio de Janeiro: Brasport, 205p. ISBN:978-85- 7452-423-8
- Takeya, T., EL-DEBS, M.K. (2007). Introdução às Pontes de Concreto. Texto de Apoio – Curso Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos.

- Thiollent, M. (2022). Metodologia da pesquisa-ação. Cortez editora.
- Toledo, N.A. (2019). Comparação de Metodologias de Inspeção e Manutenção de Obras de Arrimo no Brasil e na França. TCC (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Wong, K.Y., Ni, Y.Q. (2011) Structural health monitoring of a suspension bridge. In book: Monitoring Technologies for Bridge Management, Bakht and Mufti and Wegner (ed.), Multi Science Publishing, Essex, UK.
- Zakan, F. F. V. (2019). Comparativo da Estrutura de Contenção Tipo Gabião Executada na Canalização do Córrego Macambira e uma Estrutura em Concreto Armado.
- Zuculin, S. (2011). Curso Segurança de Barragens – Módulo II: Inspeção e Auscultação de barragens. Curso promovido pela ANA – Agência Nacional de Águas em Brasília, 2011. Disponível em <https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/24/Unidade_2-modulo2.pdf>. Acessado em 22 de dezembro de 2022.