

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

MATHEUS SOUZA DOS SANTOS

**Desenvolvimento e avaliação metrológica de
sistema de monitoramento da estabilidade de
grandes estruturas com tecnologia IoT**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA
MATHEUS SOUZA DOS SANTOS**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO
METROLÓGICA DE SISTEMA DE
MONITORAMENTO DA ESTABILIDADE DE
GRANDES ESTRUTURAS COM TECNOLOGIA
IOT**

**Trabalho de Conclusão de
Curso Submetido ao Insti-
tuto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina como parte
dos requisitos para obten-
ção do título de Bacha-
rel em Engenharia Mecatrô-
nica.**

**Orientador: André Roberto
de Sousa**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018

Santos, Matheus Souza dos
DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DA ESTABILIDADE DE GRANDES ESTRUTURAS COM TECNOLOGIA IOT/ Matheus Souza dos Santos; orientação André Roberto de Sousa-Florianópolis,, SC, 2018.
68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)- Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. IoT. 2. Monitoramento de estruturas. 3. Instrumentação predial. I. Souza, André Roberto de. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.

MATHEUS SOUZA DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DA ESTABILIDADE DE GRANDES ESTRUTURAS COM TECNOLOGIA IOT

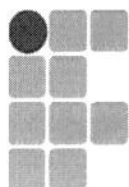
Esse trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2018:

André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Roberto Alexandre Dias, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Valdir Noll, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **MATHEUS SOUZA DOS SANTOS**, matrícula nº **141000297-7**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DA ESTABILIDADE DE GRANDES ESTRUTURAS COM TECNOLOGIA IOT**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2018.

Prof. Orientador do TCC: André Roberto de Sousa

Dedico esse trabalho, com muito amor e gratidão, aos meus pais, Lauri e Zélia. Que não mediram esforços para lutar por minha educação. Essa vitória é nossa!

AGRADECIMENTOS

A minha família que sempre me incentivou para que eu realizasse este sonho e buscasse novos conhecimentos, em especial meu pai e minha mãe, por me mostrarem, desde de pequeno, o valor do trabalho e pelos inúmeros conselhos.

Aos amigos que me acompanharam durante toda esta trajetória.

Ao Grupo Logica-e por acreditar em meu potencial, pelos conhecimentos transmitidos e por disponibilizar a estrutura e o equipamento para a realização deste trabalho.

Ao professor André, por toda atenção e orientação durante minha graduação e desenvolvimento deste trabalho.

"A tecnologia tornou possível a existência de grandes populações. Grandes populações agora tornam a tecnologia indispensável". Joseph Krutch.

RESUMO

O emprego de sistemas de medição para o monitoramento remoto de estruturas prediais é uma prática bastante disseminada em países desenvolvidos, no que se costuma designar como *Structural Health Monitoring* (SHM). Sensores são instalados ao longo da estrutura para medir deslocamentos e esforços que possam indicar a deterioração da sua estabilidade. As informações são utilizadas para a geração de relatórios, diagnósticos e alarmes que auxiliem nas ações de manutenção que assegurem a confiabilidade operacional dessas estruturas a um custo racional. No Brasil, infelizmente essa prática ainda é uma exceção destinada a muitos poucos casos, predominando inspeções visuais esporádicas nas estruturas, e muitas ações de reparo emergencial a custos elevadíssimos, quando não ocorrem interrupção operacional por colapso das estruturas, em muitos casos com pessoas feridas e mortas.

O advento da internet e dos dispositivos conectados a ela, *Internet of Things* (IoT), tem aberto muitas possibilidades de monitoramento em inúmeras aplicações, e a área de estruturas prediais pode ser grandemente beneficiada por novos sensores e novas tecnologias de comunicação e processamento de dados. Diversos sistemas têm sido desenvolvidos para tornar prática a implementação de soluções de monitoramento usando a internet, abrindo um grande campo para o desenvolvimento de soluções inovadoras para problemas na área de estruturas prediais.

Este trabalho trata do desenvolvimento e validação metrológica de uma aplicação de IoT voltada para o monitoramento de estruturas prediais. O trabalho desenvolvido em parceria com a Logicae, uma empresa de tecnologia de Santa Catarina, procurou desenvolver a engenharia de aplicação de uma solução de IoT para o monitoramento de deslocamentos em estruturas com vistas a avaliar a sua estabilidade operacional. Um módulo de coleta de dados inteligente da empresa foi utilizado e, em torno dele, uma solução de monitoramento foi configurada, construída e avaliada em condições de laboratório. Os resultados encontrados permitem afirmar que o sistema demonstra excelente potencial para emprego na finalidade proposta.

Palavras-chave: IoT, Monitoramento de estruturas, Instrumentação predial.

ABSTRACT

The application of measurement system for remote monitoring of building is very disseminated in developed countries, in which they are called Structural Health Monitoring (SHM). Sensors are installed along the structure to measure displacements and strains that could indicate the deterioration of its stability. The info are used to generate reports, diagnostics and alerts that helps in the actions of maintenace which ensure the operational reliability of those structures by saving costs. Unfortunately, in Brazil, this practice still is a exception destined to few cases, prevailing casual visual inspections in the buildings and a lot of emergency repair by expansive costs, when not buildings are interdicted because of structural collapses, in which a lot of cases end up with people wounded or casualties.

With the advance of the internet and connected devices, the Internet of Things (IoT) has opened a lot of possibilities of monitoring in countless applications and the Structural Buildings sector can benefit greatly with new sensors and technologies of communication and data processing. Several systems have been developed to facilitate the implementation of monitoring solutions using the internet, opening great opportunities of innovative solutions to Structures Buildings.

This essay deals with the development and metrological validation of an IoT application for the monitoring of building structures. Developed in partnership with a tech company from the state of Santa Catarina, Brazil, this work had the goal to create an the planning to applicate the equipment of IoT for the monitoring of displacements in structures in order to evaluate its operational stability. A module of smart data collect was used and around it a monitoring solution was configured, built and evaluated in laboratorial conditions. The results shows that the system has excellent potential to be applied in the proposed purpose.

Keywords:IoT, Structure Monitoring, building strumentation..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Viaduto Marginal Pinheiros	25
Figura 2 – Torno vertical CNC	26
Figura 3 – Conectividade	27
Figura 4 – Avaliação de deslocamentos em estruturas	29
Figura 5 – Ponte Tacoma Narrows	31
Figura 6 – Ponte Morandi - Itália	31
Figura 7 – Pontes de acesso a Florianópolis - SC	32
Figura 8 – Barragem do Fundão vazia a frente e barragem do Germano ainda cheia atrás - Mariana - MG	33
Figura 9 – Pontes Golden Gate x Hercílio Luz	34
Figura 10 – Topografia	35
Figura 11 – Estação total	35
Figura 12 – Sensoriamento por fibra óptica	36
Figura 13 – Sensoriamento por LVDT	36
Figura 14 – Acelerômetro Golden Gate	37
Figura 15 – Estrutura de concreto da Usina Hidroelétrica de Itaipu	41
Figura 16 – Produtos Logica-e - CIANOVE	42
Figura 17 – Métodos de medição	44
Figura 18 – GUM - Guia para Expressão da Incerteza de Medição	47
Figura 19 – Roteiro para a estimativa da incerteza de medição	47
Figura 20 – Sensor de deslocamento modelo 3D x construído	49
Figura 21 – Arranjo de leitura	50
Figura 22 – Página inicial uselesense	51
Figura 23 – Abas de configuração Web LEsense	51
Figura 24 – Aba últimas leituras Web LEsense	52
Figura 25 – Monitor LEsense	53
Figura 26 – Menu principal	53
Figura 27 – Medição de estruturas	54
Figura 28 – Nova medição de estrutura	54
Figura 29 – Início de medição	55
Figura 30 – Gráfico de medições	55
Figura 31 – Lista de últimas leituras	56
Figura 32 – Medições finalizadas	56
Figura 33 – Levantamento da curva de resposta do transdutor	57
Figura 34 – Linearização da curva de resposta	59

Figura 35 – Roteiro calibração do Sistema de medição	60
Figura 36 – Curva de erros do sistema de medição	63
Figura 37 – Conceito do ensaio de estabilidade	64
Figura 38 – Ensaio de estabilidade	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrão mm x Valor medido em V (P1 A P5)	58
Tabela 2 – Padrão mm x Valor medido em V (P6 A P10)	58
Tabela 3 – Média linearizada e erro de linearidade	60
Tabela 4 – Ciclos de calibração (Ciclo 1 a 5)	61
Tabela 5 – Ciclos de calibração (Ciclo 6 a 10)	61
Tabela 6 – Tendência	62
Tabela 7 – Desvio padrão e repetibilidade	62
Tabela 8 – Erro máximo do sistema de medição	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SHM <i>Structural Health Monitoring</i>	11
LVDT <i>Linear Variable Differential Transformer</i>	36
IoT <i>Internet of Things</i>	11
RFID <i>Radio Frequency IDentification</i>	39
ICESP Instituto do Câncer do Estado de São Paulo	39
IFSC Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina	
Sinaenco Sindicato das Empresas de Arquitetura e Engenharia	25
Deinfra Departamento Estadual de Infraestrutura	32
ELU Estados Limites de Últimos	30
ELS Estados Limites de Serviço	30
BIM <i>Building Information Modeling</i>	41

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Resistência elétrica (Ohm)
V	Tensão elétrica (Volts)
A	Corrente elétrica (Ampere)
m	Milésimo (mili)
MB	Megabyte (Megabyte)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Importância do monitoramento da estabilidade de grandes estruturas	25
1.2	Objetivos do Trabalho	28
1.2.1	Objetivo Geral	28
1.2.2	Objetivos Específicos	28
2	ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS METÁLICAS E DE CONCRETO ARMADO	29
2.1	Requisitos funcionais das estruturas	29
2.2	Causas e Consequências de Instabilidades Geométricas	30
2.3	Vantagens do monitoramento de instabilidades em estruturas .	33
2.4	Sistemas atuais empregados no monitoramento de estruturas .	34
3	TECNOLOGIAS IOT	39
3.1	Introdução e conceitos	39
3.2	Aplicações de dispositivos IoT em medição remota	39
3.3	Potencialidades dos dispositivos IoT no monitoramento de estruturas	40
4	VALIDAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO	43
4.1	Introdução e conceitos	43
4.2	Quantificação dos erros sistemáticos e aleatórios	44
4.3	Estimativa de incerteza de medição	46
5	SISTEMA DE MONITORAMENTO DA ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS	49
5.1	Transdutor de deslocamento	49
5.2	Módulo de aquisição e transmissão de sinais	50
5.3	Software e interface de aplicação	51
5.4	Aplicação móvel para o monitoramento remoto	52
6	VALIDAÇÃO METROLÓGICA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO	57
6.1	Determinação da curva de resposta do transdutor de deslocamento	57
6.2	Calibração do sistema de monitoramento	60

6.3	Ensaio de avaliação da estabilidade temporal do sistema de monitoramento	64
7	CONCLUSÃO	65
7.1	Desempenho e aplicabilidade do sistema de monitoramento . .	65
7.2	Propostas de melhorias do sistema desenvolvido	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância do monitoramento da estabilidade de grandes estruturas

A frequente ocorrência de problemas de estabilidade em grandes estruturas, por ação do uso e do tempo, ampliadas pela falta de monitoramento e manutenção, leva a interrupções inesperadas na sua operação ou mesmo ao colapso, trazendo além prejuízos financeiros, risco à vida de pessoas que utilizam ou estão próximos a estas estruturas.

Segundo pesquisa realizada pelo Sindicato das Empresas de Arquitetura e Engenharia (Sinaenco) no ano de 2017, somente na cidade de São Paulo, 73 pontes e viadutos possuem problemas estruturais, decorrente da falta de monitoramento e manutenção das estruturas, entre elas, importantes obras para o trânsito da cidade (SINAENCO, 2017). Em novembro de 2018, esta falta de acompanhamento constante ficou evidenciada quando colapsou um dos pilares do viaduto da Marginal Pinheiros, uma das vias de maior fluxo de veículos de São Paulo, ocasionando o desnivelamento da pista e acidentes de trânsito. Figura 1.

Figura 1 – Viaduto Marginal Pinheiros



(a) Viaduto Marginal Pinheiro - SP

(b) Pilar do Viaduto

Fonte: G1 (www.g1.com.br, acessado em 20/11/2018).

Problemas estruturais como este não são exclusividade de estruturas rodoviárias. Máquinas de grande porte utilizadas em processos precisos de fabricação, têm sua performance relacionada diretamente a manutenção de sua geometria, como é o caso, de tornos verticais (Figura 2), que são utilizados na fabricação de grandes cilindros para maquinários de produção de papel. Neste tipo de estrutura, a verificação da estabilidade é realizada com maior periodicidade do que em obras rodoviárias, entretanto, não são

verificadas durante o funcionamento normal da estrutura, exigindo uma parada da máquina, para que seja possível realizar um diagnóstico.

Figura 2 – Torno vertical CNC



Fonte: <http://www.hergen.com.br>.

A falta de uma verificação constante, faz com que não seja possível diagnosticar os impactos causados por ações não previstas durante o processo de produção, tais como, colisões de ferramentas, forças de corte muito elevadas e desgaste de componentes. Desta forma, há um aumento no refugo de peças com desperdício de tempo de produção e aumento dos custos de manutenções, uma vez que, as manutenções passam a ser sempre corretivas e não preditivas, colocando em risco a integridade da estrutura e de seus usuários.

Tanto no caso de estruturas prediais como em outras aplicações onde a estabilidade geométrica seja importante, o modo mais eficiente e racional de se estabelecer ações de manutenção é através do monitoramento contínuo da estrutura, que pode ser realizado por sensores (de deslocamento, força, pressão, temperatura, etc.) instalados nestas estruturas e conectados a sistemas computadorizados de aquisição e processamento de dados.

Na área predial, com a modernização dos sistemas de construção, de modo geral, o desenvolvimento de estruturas inteligentes e o monitoramento do desempenho vem ganhando notoriedade nos últimos anos, derivada da tendência de áreas já consagradas como a automobilística, (COLOMBO et al., 2014). Prédios e máquinas instrumentados que tornam visíveis suas condições operacionais, fornecem informações preciosas para adequar a sua utilização e para orientar ações de manutenção, assegurando uma vida útil longa, segura e economicamente sustentável. Como principais

vantagens dessa estratégia podem ser citadas:

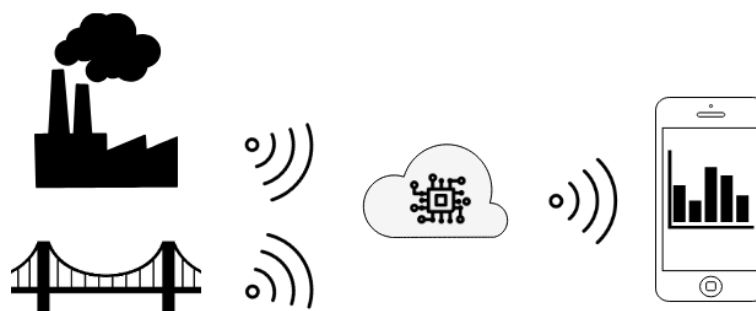
- Ações de manutenção orientadas pelas necessidades reais, e não por planos preventivos ou ações corretivas;
- Acompanhamento contínuo da degradação da estrutura, muito mais eficiente do que inspeções discretas.
- Identificação de uso inadequado da estrutura (ex. sobrecargas), orientando os usuários e gestores à definição de melhores práticas operacionais;
- Redução de custos com ações emergenciais e interrupções não programadas;
- Aumento de segurança operacional contra acidentes e vítimas.

O monitoramento de estruturas é uma prática consolidada em muitos países desenvolvidos, e as tecnologias empregadas para a medição e comunicação têm evoluído bastante, na direção da redução de custos e flexibilidade operacional.

O desenvolvimento das tecnologias de comunicação baseadas na internet e a integração de dispositivos de medição nesta rede, têm permitido o desenvolvimento acelerado de tecnologias de monitoramento inovadoras. A grande vantagem dos dispositivos com tecnologia IoT é a capacidade de conexão com a internet e com outros sistemas de um modo muito flexível e acessível.

A partir de um dispositivo de medição com capacidade de conexão com a internet, como exemplificado na Figura 3, é possível tornar a informação disponível a outros dispositivos como smartphones, apresentando a informação em tempo real, para que as tomadas de decisões sejam mais rápidas, assertivas e os prejuízos minimizados.

Figura 3 – Conectividade



Fonte: Próprio autor.

Neste conceito, muitas aplicações de monitoramento de processos têm surgido e crescido acentuadamente, e muitas empresas de tecnologia têm direcionado esforços no desenvolvimento de soluções de hardware e software que aproveitem o excelente potencial da IoT para monitoramento de processos.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho procurou desenvolver e validar metrologicamente uma aplicação de IoT voltada para o monitoramento de estruturas prediais, focando na engenharia de aplicação de uma solução de IoT para o monitoramento de deslocamentos em estruturas com vistas a avaliar a sua estabilidade operacional. O seu escopo foi definido para atingir os seguintes objetivos Geral e Específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

- Desenvolver e avaliar metrologicamente um sistema de monitoramento de estabilidade de estruturas baseado em tecnologia IoT.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar sobre problemas de estabilidade em estruturas e as tecnologias de sensoriamento possíveis para o seu monitoramento;
- Especificar componentes para compor um sistema de monitoramento de estruturas;
- Integrar os componentes de hardware e software para operacionalizar o sistema;
- Desenvolver uma aplicação móvel para visualização dos dados coletados;
- Calibrar o sistema e estimar a sua incerteza de medição;
- Aplicar o sistema para o monitoramento em condições de laboratório.

2 ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS METÁLICAS E DE CONCRETO ARMADO

2.1 Requisitos funcionais das estruturas

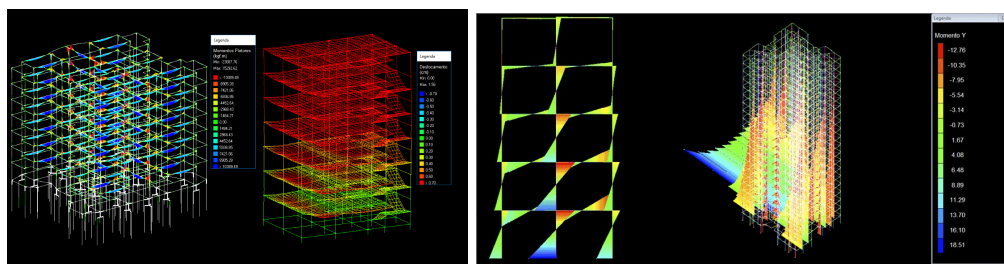
O principal requisito funcional de uma estrutura é atender as solicitações dos esforços demandados da entidade a ser concebida, de modo que seja o mais seguro possível.

Para Dias (1997), estrutura é parte ou conjunto das partes de uma construção que se destina a resistir a cargas. Ainda segundo ele, cada peça estrutural, deve resistir aos esforços incidentes, transmiti-los a outras peças, conduzindo até o solo.

Segundo Bellei, Pinho e Pinho (2008), as estruturas devem ter resistência para suportar as cargas e suas combinações, manter as deformações elásticas dentro dos limites projetados e ainda manter as vibrações dentro de limites confortáveis.

Dentre esses esforços, são considerados para avaliação e projeto de concreto armado e de estruturas metálicas: ações permanentes, que ocorrem durante toda a vida útil da estrutura, como o próprio peso dos elementos que a compõe; ações variáveis, que durante a vida útil da estrutura variam, como ventos, temperatura e vibrações ou ainda; ações excepcionais, que são de curta duração e com baixa probabilidade de acontecer como explosões ou sismos. Todas estas ações devem ser consideradas em projeto e podem ser avaliadas previamente na maioria dos softwares utilizados para dimensionamento de estruturas. Como podemos visualizar na Figura 4.

Figura 4 – Avaliação de deslocamentos em estruturas



(a) Software Eberick - AutoQI

(b) Software Alvest - TQS

Fonte: AutoQI e TQS.

De acordo com as normas (NBR6118, 2004) e (NBR8800, 2008), as estruturas

de concreto armado e estruturas metálicas, respectivamente, devem atender aos requisitos mínimos de qualidade durante a construção e serviço, esses requisitos são classificados em três grupos:

- Capacidade de resistência, que consiste na segurança a ruptura;
- Desempenho em serviço, que consiste na capacidade da estrutura em manter-se em plenas condições, não devendo apresentar nenhum dano;
- Durabilidade, que consiste na capacidade da estrutura em resistir as influências ambientais previstas. Todos esses itens garantem a estabilidade estrutural.

As estruturas e elementos estruturais devem possuir resistência, rigidez e dureza adequada para garantir a funcionalidade durante a vida útil e ainda prover a possibilidade de excesso de carga (BELLEI; PINHO; PINHO, 2008).

Para garantir a funcionalidade das estruturas, são realizados estudos a fim de verificar as chances de uma estrutura atingir os estados limites (ruir¹). Estes são divididos em duas categorias: resistência e utilização.

- Estados Limites de Últimos (ELU) são fenômenos comportamentais como resistência, máxima flambagem, fadiga, fratura, torção e deslizamento.

- Estados Limites de Serviço (ELS) são aqueles ligados com a ocupação, como deformações, vibrações e trincas.

Desta forma, quando se tem o atingimento do ELU e ELS, as solicitações são maiores que as capacidades de resistência e se estabelece a instabilidade geométrica.

2.2 Causas e Consequências de Instabilidades Geométricas

A falta de uma minuciosa análise estrutural é um dos fatores mais relevantes quando o assunto é estabilidade estrutural. É nesta etapa que se realiza todo o estudo das cargas na estrutura, bem como, é projetado o modelo estrutural utilizado para obter as forças internas e as deformações em pontos estratégicos das estruturas.

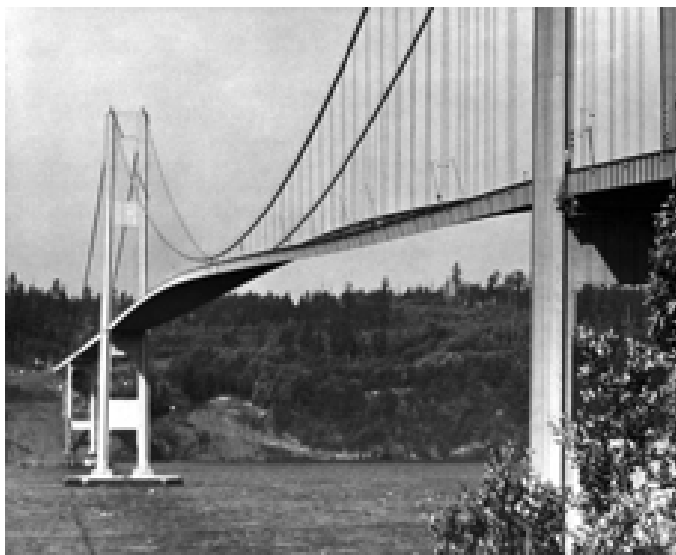
De acordo Kripca (2011), a análise estrutural é um estudo essencial do comportamento das estruturas, quando submetidas a todos os carregamentos que ela suportará durante sua vida útil.

As principais consequências de uma falha na análise estrutural são deformações excessivas, fadiga, torções, deslizamentos desnecessários, vibrações, trincas e até fratura dos elementos.

¹ Cair violentamente e subitamente, desabar

Situações como estas já foram presenciadas no mundo todo, como o conhecido caso da ponte Tacoma Narrows, nos Estados Unidos, que entrou em colapso após fortes ventos atingirem sua estrutura, fazendo-a oscilar. A Figura 5 mostra uma imagem real da ponte em oscilação.

Figura 5 – Ponte Tacoma Narrows



Fonte: <https://blogdaengenharia.com>.

Na Itália, em agosto de 2018, um caso semelhante também aconteceu, na ponte Morandi, que foi parcialmente destruída após um dos pilares colapsar. A ponte foi construída em 1960 e as reais causas ainda não foram informadas. A Figura 6 mostra a ponte parcialmente destruída.

Figura 6 – Ponte Morandi - Itália

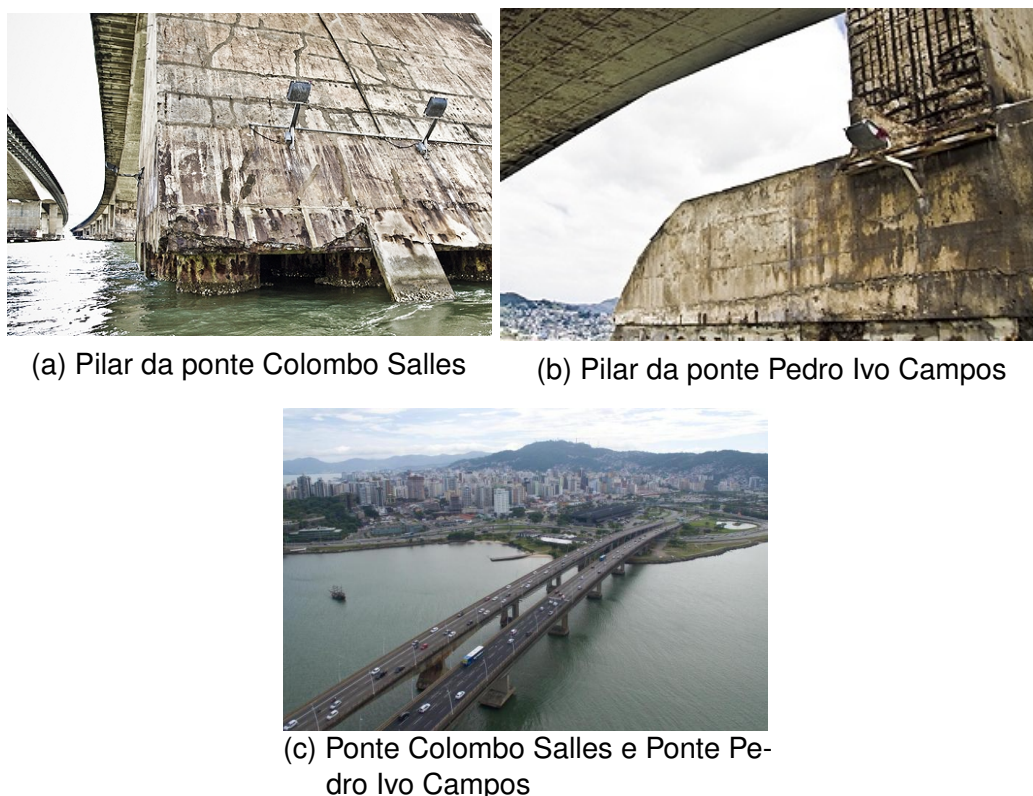


Fonte: <https://noticias.r7.com>

As pontes Pedro Ivo Campos e Colombo Salles, que dão acesso a ilha de Florianópolis em Santa Catarina, estão em situação preocupante e semelhantes às

condições presenciadas antes do colapso das estruturas apresentadas a cima. As inspeções visuais realizadas em 2013 pelo Departamento Estadual de Infraestrutura (Deinfra) de Santa Catarina, apontavam problemas estruturais, como corrosão das estruturas metálicas e desprendimento de fragmentos de concreto, conforme imagens da Figura 7. Após o levantamento, não foi realizado nenhum monitoramento dinâmico que permitisse a análise do comportamento real da estrutura, apenas análise pontual dos problemas encontrados na inspeção visual.

Figura 7 – Pontes de acesso a Florianópolis - SC



Fonte: Clic RBS.

A maior catástrofe ambiental já registrada no Brasil, foi o rompimento da barragem do Fundão que detinha entre 40 e 60 milhões de m³ de rejeitos de mineração de ferro em Mariana, Minas Gerais. Após o rompimento repentino da barragem, os rejeitos atingiram cerca de 663 km de corpos hídricos, diretamente 32 municípios e aproximadamente 4238 pessoas, de acordo com Coelho (2015). Para Santiago e Cintra (2017) o rompimento da barragem está diretamente relacionado a falta de monitoramento das estruturas. Na imagem apresentada na Figura 8 é possível verificar a barragem de Fundão já vazia e a barragem do Germano ainda cheia. A contenção visualizada na imagem é semelhante a que se rompeu.

Todos esses casos exemplificam a enorme importância do monitoramento contínuo de estruturas, tanto metálicas como de concreto armado.

Figura 8 – Barragem do Fundão vazia a frente e barragem do Germano ainda cheia atrás - Mariana - MG



Fonte: <https://jornalggn.com.br>

2.3 Vantagens do monitoramento de instabilidades em estruturas

O monitoramento da integridade das estruturas na construção civil, é chamado de monitoramento da saúde estrutural, tradução literal do inglês SHM. Esse monitoramento é fundamental para se garantir a segurança das estruturas, além de melhor, otimizar e reduzir os custos de manutenção.

As principais vantagens em monitorar as estruturas, seja ela de pequeno ou grande porte, são:

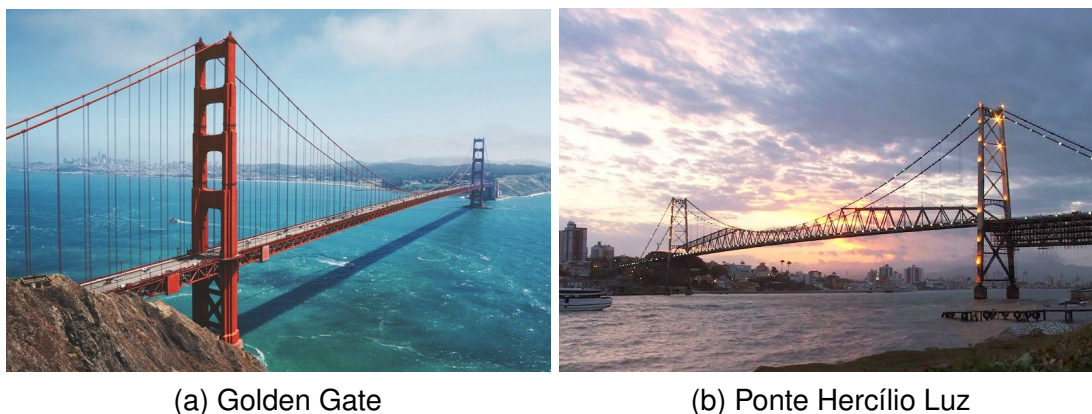
- Obtenção de dados reais do comportamento da estrutura;
- Realização de mais manutenções preditivas e menos corretivas;
- Redução dos custos de manutenções;
- Aprimoração do planejamento de intervenções;
- Antecipação de possibilidades de colapsos.

O SHM é frequentemente utilizado em países como Estados Unidos, China e Japão, mas no Brasil, as tecnologias empregadas ainda são praticamente manuais e o processamento e análise dos dados, ainda demoram muito tempo comparado aos outros países. Predomina no Brasil a falta de cultura no monitoramento contínuo de estruturas, sendo a inspeção realizada de modo bastante deficiente, normalmente quando a estrutura já apresenta problemas.

Esse modo de monitoramento impede a prática de manutenção preditiva, muito mais segura e econômica do que as manutenções preventiva ou corretiva dessas estruturas. Uma situação distinta pode ser observada em duas estruturas semelhantes,

mas em estados de conservação completamente distintos. A ponte Golden Gate em São Francisco (EUA) é continuamente monitorada e ações de manutenção são acionadas sempre que é percebida alguma alteração estrutural, encontrando-se perfeitamente operacional, com tráfego de pessoas e automóveis liberado. A ponte Hercílio Luz em Florianópolis (SC) foi utilizada até a sua exaustão sem monitoramento estrutural e com poucas ações de manutenção ao longo do tempo, encontrando-se em processo de recuperação e bloqueada ao tráfego desde 1991.

Figura 9 – Pontes Golden Gate x Hercílio Luz



Fonte: Unsplash e Lookfordiagnosis.

A falta de cultura e de um sistema de monitoramento em tempo real, que possa fornecer informações online para o monitoramento de estrutura precariza a aplicação de SHM no Brasil.

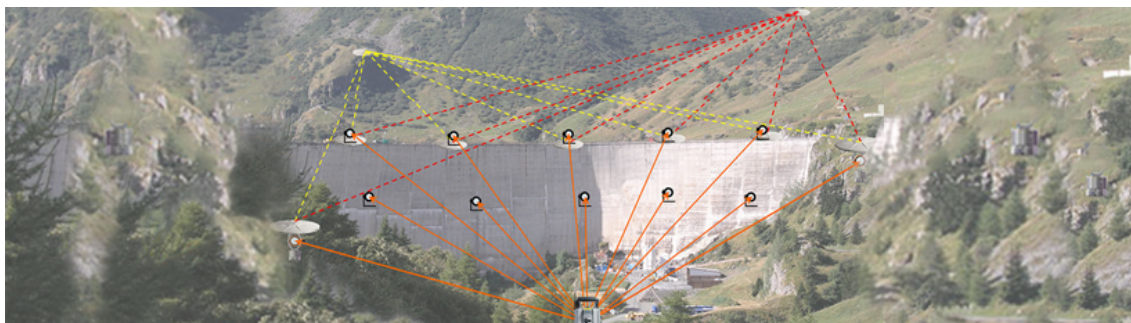
2.4 Sistemas atuais empregados no monitoramento de estruturas

A tecnologia mais empregada no Brasil para monitoramento de estruturas, é a topografia. Presente em quase todo canteiro de obra, a topografia é utilizada para monitorar movimentos na estrutura, desde alicerce de prédios até barragens. Na Figura 10 é possível visualizar o monitoramento de um muro de contenção por meio da topografia.

Esse processo, é na maioria das vezes, manual e caracterizado pela verificação periódica, com auxílio de equipamentos específicos, de pontos físicos marcados na estrutura. Coloca-se o equipamento em uma determinada posição, faz-se a leitura das coordenadas, ângulos e distâncias dos pontos, anota-se em planilhas e realiza-se uma análise posterior.

De acordo com Barbosa et al. (2016), atualmente o mercado dispõe de estações totais (Figura 11), equipamento responsáveis pela leitura das coordenadas, ângulos e distâncias, de altíssima precisão, que são utilizados para as mais diversas análises juntamente com níveis e trenas.

Figura 10 – Topografia



Fonte: Santiago e Cintra (2017)

Figura 11 – Estação total



Fonte: Barbosa et al. (2016)

Outras tecnologias utilizadas para SHM, são sensores baseados em fibra óptica que são acoplados nas estruturas de forma que captam em tempo real as oscilações das estruturas. Comumente aplicado a SHM de pontes, o sistema realiza a captação das oscilações através da análise do comportamento das ondas luminosas, quando a fibra é esticada ou comprimida, há uma mudança no comprimento de onda que é percebido e interpretado por um módulo de leitura. Os módulos normalmente não oferecem acesso remoto aos dados. A Figura 12 mostra esta aplicação em uma ponte.

Sistemas mais compactos também são utilizados para o monitoramento de estruturas, como a utilização de transdutores de deslocamento. Transdutores como o

Linear Variable Differential Transformer (LVDT), em português Transformador Diferencial Variável Linear e também relógios comparadores são arranjos para realizarem a medição dos deslocamentos das estruturas, como pode ser verificado na Figura 13. Neste caso, os dados são lidos e armazenados diretamente em um microcomputador para uma posterior análise.

Figura 12 – Sensoriamento por fibra óptica



Fonte: <https://www.nbg-systems.com>

Figura 13 – Sensoriamento por LVDT



Fonte: <https://dynamistechne.com>

Outra solução é a utilização de acelerômetros, como realizado por Kim et al. (2007) na ponte Golden Gate, Figura 9a. Ao longo da estrutura foram distribuídos 64 acelerômetros que comunicam-se entre si através de sinal de rádio frequência, Figura 14, até que o sinal chegue na estação base, onde os dados são tratados e armazenados. O monitoramento é feito em uma aplicação que apresenta os dados do servidor, sem conexão com a internet.

O avanço tecnológico tem proporcionado o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias de transdutores, ao mesmo tempo em que tem reduzido de modo acentuado o custo destes, potencializando o monitoramento de estruturas com confiabilidade maior e custos cada vez menores. O crescimento dos sistemas de IoT, se soma a este cenário criando possibilidades muito promissoras para esta finalidade.

Figura 14 – Acelerômetro Golden Gate



Fonte:(KIM et al., 2007)

3 TECNOLOGIAS IOT

3.1 Introdução e conceitos

Em 1999, muito provavelmente, pela primeira vez o termo IoT foi citado. Foi durante a apresentação de uma nova tecnologia, conhecida como *Radio Frequency Identification* (RFID), que Kevin Ashton utilizou IoT para descrever que RFID era uma tecnologia que dava aos computadores capacidade de entender o mundo sem necessitar da interação do homem, Ashton (2009). E hoje é um dos termos mais utilizados para simbolizar a mais nova revolução industrial.

Hoje o termo é amplamente utilizado para descrever dispositivos ligados na internet, tais como eletrodomésticos e smartphones e, a cada dia, mais máquinas, carros e casas se conectam. Não é mais exclusividade dos microcomputadores o acesso à rede, dispositivos que possibilitam a conectividade estão menores, mais econômicos e por isso estão cada vez mais dentro de aparelhos IoT, Opservices (2017).

Assim como comenta Azevedo (2017), vivemos um mundo em constante transformação digital, com extrema automação e extrema conectividade. Quase tudo baseado em informação em tempo real, possibilitando tomadas de decisão e ações em tempos muito curtos, possibilitando a digitalização de quase todas as coisas.

Essa crescente demanda de informações, em que tudo precisa estar conectado e disponível, faz com que seja necessário o armazenamento de uma grande quantidade de informação e que estas informações estejam disponíveis em qualquer lugar a qualquer hora, surge então o conceito de armazenamento em nuvem, uma grande quantidade de informação na internet.

3.2 Aplicações de dispositivos IoT em medição remota

A possibilidade de conectar dispositivos na rede é enorme, desde simples aplicações, em termos de informação, como o monitoramento de temperatura de uma sala cirúrgica, até aplicações mais complexas como o monitoramento de linhas de produção, onde uma máquina depende de informações da outra para a continuidade da linha.

Um exemplo de aplicação, é o monitoramento de temperatura realizado em algumas alas do Instituto do Câncer do Estado de São Paulo (ICESP). Antes da implementação da solução era necessária uma coleta diária, realizada manualmente,

três vezes ao dia, onerando o ICESP e não permitindo um acompanhamento em tempo real, não sendo capaz de registrar picos de temperatura em alguns momentos do dia, informações que podem ser cruciais, por exemplo em um laboratório de exames ou em uma câmara fria de remédios. Após a implementação, o sistema realiza a medição de temperatura em tempo real, 24 horas por dia, 7 dias por semana, disponibilizando os dados em uma plataforma web, (SENSORWEB, 2013).

Outra aplicação é a medição de umidade do solo durante o preparo de áreas compactadas para construção de barragem. O processo utilizado hoje é empírico e totalmente dependente da análise visual do encarregado da obra. É depositada e espalhada uma camada de composto e com um caminhão pipa o composto já espalhado é molhado e posteriormente compactado com um rolo compressor. Após a compactação o encarregado pelo serviço verifica a camada compactada e determina se haverá ou não mais um processo de molhamento composto. A partir da aprovação da camada uma amostra do material é recolhido e levado a um laboratório para análise da umidade, se reprovado, toda a camada é arrancada e refeita novamente.

Com a implementação do sensoriamento remoto, a decisão de aprovação ou não de uma camada compactada não dependerá mais de uma análise visual do encarregado e sim de um equipamento calibrado capaz de informar em segundos a real umidade do solo, reduzindo o desperdício de material, tempo de operação, criando um histórico para tomada de decisões futuras e reduzindo o custo da operação, (LESENSE, 2018).

Inúmeras outras aplicações de sensoriamento podem ser realizadas a partir de um sistema IoT, nas áreas de eficiência energética, consumo de insumos, nível de líquidos e sólidos entre muitos outros. Qualquer unidade capaz de ser medida através de um sensor pode ser monitorada remotamente utilizando-se IoT.

3.3 Potencialidades dos dispositivos IoT no monitoramento de estruturas

Mesmo nos Estados Unidos, onde o SHM é bastante difundido, o monitoramento estrutural utilizando IoT não é largamente utilizado. Em grande maioria, os sistemas armazenam as informações em *data loggers*¹, para uma posterior análise ou apenas mostram o dado para uma leitura visual sem nem mesmo armazenar as informações. Poucas empresas no mundo oferecem um sistema de monitoramento em tempo real, capaz de mostrar as informações e históricos dos dados coletados em uma plataforma web.

¹ Unidades de armazenamento de dados

No Brasil, este aspecto é ainda pior, pois em grande maioria, não há nem o monitoramento constante, mesmo que manual. Por exemplo, na Usina Hidroelétrica de Itaipu Figura 15, uma das maiores obras do Brasil e a maior geradora de energia renovável do mundo, possui 2792 instrumentos que monitoram os mais diversos parâmetros da estrutura, porém somente cerca de 270 são monitorados em tempo real e capazes de emitir alerta. Todos os demais instrumentos são lidos manualmente, em uma rotina diária de inspeção, (ITAIPU, 2015).

Figura 15 – Estrutura de concreto da Usina Hidroelétrica de Itaipu



Fonte: (ITAIPU, 2015)

Além do potencial gerado pelo baixo nível de monitoramento realizado hoje, a aplicabilidade de um sistema de monitoramento baseado em IoT é mais um avanço tecnológico para o mercado da construção civil, que nos últimos anos, está se abrindo para as novas tecnologias. Um exemplo é a utilização de *Building Information Modeling* (BIM), que é a digitalização de toda a construção, reunindo todas as informações pertinentes em um só lugar, possibilitando a interoperabilidade e o intercâmbio de informações.

Essa tecnologia no futuro próximo irá aumentar a quantidade de estruturas inteligentes, que podem ajustar suas condições de operação e manutenção a partir de dados medidos, comunicados e processados, que indiquem alterações indesejáveis que necessitam de intervenções e ajustes.

A área de construção civil como um todo é um grande demandante potencial deste tipo de solução, tanto pela enorme utilidade destas tecnologias, pelos grandes valores financeiros envolvidos nesta área, pela importância estratégica do monitoramento para a segurança operacional, e pelo grande atraso tecnológico que a área de construção civil tem em relação, por exemplo, à indústria em geral (automobilística, alimentícia, energia, etc.).

Isso tem oportunizado negócios em tecnologia voltados à área de construção civil, com o surgimento de empresas de tecnologia direcionadas para este mercado. O Grupo Logica-e, parceira no desenvolvimento deste trabalho por meio da unidade de negócio CIANOVE, é uma empresa de tecnologia de Santa Catarina, que desenvolve soluções para a área de construção civil. Também fazem parte do Grupo Logica-e a unidade de negocio LEsense, sistema de coleta inteligente de dados e a Lógica-e Design House que desenvolve projetos de engenharia eletrônica.

A CIANOVE é fabricante de sistemas de automação para elevadores cremalheira (Figura 16a) desde 2012 e está preparando o lançamento de um sistema de gestão de equipamentos e operações, que está sendo desenvolvido para uso em aplicações em obras de médio e grande porte. Algumas das aplicações são a medição de umidade do solo durante a compactação (Figura 16b), monitoramento e controle de elevadores de obras, guias e demais equipamentos, além da gestão de equipes de manutenção.

Figura 16 – Produtos Logica-e - CIANOVE



(a) Automação para cabine de elevador cremalheira



(b) Monitoramento de umidade do solo

Fonte: <http://logicae.com.br/>.

4 VALIDAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

4.1 Introdução e conceitos

Medir um processo ou um fenômeno é uma maneira de quantificar seus efeitos e obter informações reais de seu estado, a fim de monitorar, controlar ou investigar.

A medição pode acontecer de duas maneiras:

-Direta, quando se utiliza apenas um sistema é aplicado na medição e o resulta é obtido diretamente, utilizando apenas uma medição, como a utilização de uma trena para medir o comprimento de uma parede.

-Indireta, quando se utiliza mais de uma medida para se chegar ao resultado final, como utilizar um trena para medir a área de uma sala, onde é necessário realizar a multiplicação dos comprimentos dos lados da sala para obter a sua área.

O mesmo sistema de medição pode realizar medições diretas e indiretas de acordo com a aplicação realizada com ele para se obter um resultado.

Segundo Albertazzi e Sousa (2008), são três os principais métodos de medição, comparação, indicação e diferencial, que combina elementos dos dois primeiros.

O método de medição por comparação é caracterizada pela comparação do mensurando com um objeto, cujo valor de referência é muito bem definido. De forma que se busque o equilíbrio entre mensurando e objeto de referência em um dispositivo comparador, como mostra a Figura 17a.

O método de medição por indicação é caracterizado por tornar perceptível ao usuário um valor proporcional do mensurando, geralmente informando visualmente pela deflexão de um ponteiro ou incrementos no valor de um mostrador digital (Figura 17b).

O método de medição diferencial é compostos por uma combinação entre os métodos de comparação e de indicação, onde o mensurando é comparado a uma medida materializada, cujo valor é próximo ao do mensurando e a diferença entre ambos é medida por um sistema que opera pelo método de indicação.

O transdutor utilizado realiza as medições de maneira direta e o sistema completo opera pelo método de indicação como será apresentado no Capítulo 6.

Por mais próximo ao perfeito que um sistema de medição seja, ele sempre apresentará uma parcela de erro, seja oriunda do sistema de medição, do operador ou

do processo de medição. O erro é a diferença entre o valor apresentado e o valor real do mensurando e são categorizado como aleatório, onde possui uma parcela imprevisível, fazendo com que repetições levem a resultados diferentes e erros sistemáticos, estes previsíveis e passíveis de correção através de erro médio (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

Figura 17 – Métodos de medição



(a) Método de comparação

(b) Método de indicação

Fonte: medicy.com.br.

Estes erros devem ser investigados e ter sua natureza conhecida para que possam ser estimados, afim de tornar a medição mais confiável.

4.2 Quantificação dos erros sistemáticos e aleatórios

Como é impossível que um sistema não contenha uma parcela de erro, quantificá-los torna-se indispensável.

É possível quantificar uma estimativa do erro sistemático efetuando-se um número finito de medições de um padrão com valor verdadeiro conhecido, tendo em vista que a estimativa do erro sistemático está diretamente ligado com a quantidade de medições realizadas. Esta estimativa chamasse de tendência e pode ser calculado por:

$$Td = I - VVC \quad (4.1)$$

onde:

Td - tendência

I - média de um número finito de indicações

VVC - valor verdadeiro convencionado do mensurando

Supomos que a média de 10 medições realizadas com um paquímetro, em uma peça com valor verdadeiro convencional seja 9,8 mm, seja 10,2 mm. Logo:

$$Td = 10,2 - 9,8$$

$$Td = 0,4 \text{ mm}$$

Em resumo, a tendência é uma propensão do sistema a indicar a mais ou a menos tal valor, como no exemplo acima, onde o paquímetro tem tendência a indicar 0,4 mm a mais. Desta forma, a partir dela, pode-se calcular a correção.

$$C = -Td \quad (4.2)$$

onde:

C - correção

Td - tendência

Sendo assim, a correção para o paquímetro é de -0,4 mm. Aplicando-se esta correção às indicações, tem-se as indicações corrigidas.

Já os erros aleatórios, podem ser calculados para cada indicação por:

$$Ea_i = I_i - I \quad (4.3)$$

onde:

Ea_i - erro aleatório da i-ésima indicação

I_i - i-ésima indicação

I - média das indicações

A partir da análise do erro aleatório, podemos definir a repetibilidade, que é faixa de valores na qual o sistema de medição tem uma probabilidade maior de indicar. Esta informação é muito importante para que se possa estimar a faixa de incerteza associadas a medição.

A rigor, o erro aleatório só pode ser conhecido caso se realize um número infinito de repetições, o que é impossível na prática. Dessa forma, a repetibilidade estima este erro aleatório para um número finito de repetições, sendo estimado matematicamente por:

$$Re = \pm t.u \quad (4.4)$$

onde:

t – coeficiente t de student, para $n - 1$ graus de liberdade e confiança estatística de 95,45%

u - incerteza padrão, erro correspondente ao desvio-padrão da amostra

A tendência e a Repetibilidade são informações numéricas que estimam respectivamente, o erro sistemático e o erro aleatório do sistema de medição, e devem ser consideradas para a estimativa da incerteza de medição do sistema.

4.3 Estimativa de incerteza de medição

Quando se relata o resultado de medição de uma grandeza física deve-se sempre dar alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. Sem essa indicação, resultados de medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência fornecidos numa especificação ou numa norma. É, portanto, necessário que exista um procedimento que seja de pronta aplicação, fácil compreensão e ampla aceitação para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar sua incerteza (GUM2008, 2012).

A estimativa da incerteza de medição obedece a procedimentos matemáticos normalizados em documentos como a norma GUM – Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM2008, 2012). Neste documento há a orientação de que para a expressão da incerteza de medição, todos os fatores que influenciam o resultado devem ser considerados e avaliados para compor o resultado final da incerteza.

Após a listagem dos fatores que afetam o resultado, estes devem ser estimados numericamente e incluídos na análise de incerteza, conhecida como balanço de incerteza. Neste balanço de incerteza, cada fator de influência será determinado e estatisticamente considerado no cálculo da incerteza de medição.

A Figura 18 ilustra este documento de referência, que será empregado no Capítulo 6 na estimativa da incerteza de medição do sistema desenvolvido.

No método definido por este Guia, algumas das componentes necessárias para estimar a incerteza da medição podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições. A repetibilidade é um exemplo de avaliação de incerteza tipo A, obtida experimentalmente.

Outras componentes podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, a partir de informações obtidas por meios como certificados

de calibração, informações de catálogo, valores deduzidos com base na experiência profissional, etc.

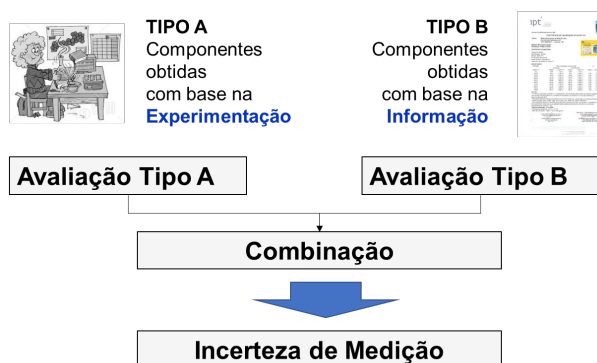
Figura 18 – GUM - Guia para Expressão da Incerteza de Medição



Fonte: http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf

As componentes obtidas nas avaliações Tipo A e Tipo B (bem como erros sistemáticos não corrigidos) devem ser combinadas matematicamente de maneira apropriada para a obtenção da Incerteza do Resultado de Medição Figura 19.

Figura 19 – Roteiro para a estimativa da incerteza de medição



Fonte: Elaboração própria.

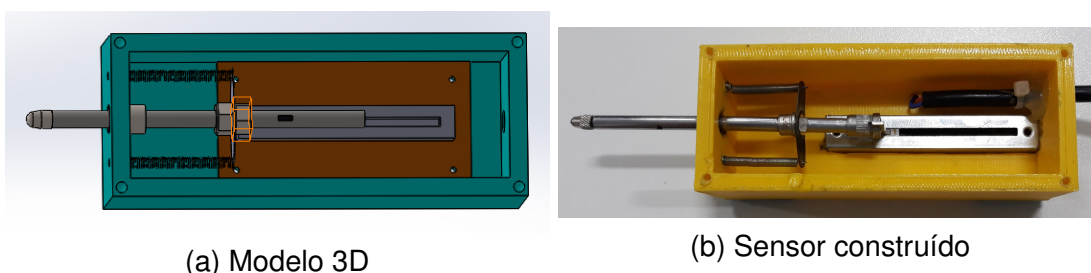
5 SISTEMA DE MONITORAMENTO DA ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS

5.1 Transdutor de deslocamento

Os sensores disponíveis no mercado e que são utilizados em diversas aplicações, como visto no Capítulo 2, possuem um custo elevado por se tratar de instrumentos de precisão. Em grande parte das aplicações eles são subutilizados, quando analisado sua precisão frente as características de aplicação na medição de grandes estruturas.

Tendo em vista o alto custo para aquisição de um sensor comercial para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um transdutor de deslocamento desenvolvido por uma pesquisa do laboratório de metrologia do IFSC, que visou a fabricação de um transdutor que possuísse uma precisão condizente com aplicação e baixo custo. Ele possui uma arquitetura simplificada e foi elaborado a partir de componentes de um relógio comparador e alguns itens disponíveis na instituição. O modelo projetado e o construído podem ser visualizados na Figura 20.

Figura 20 – Sensor de deslocamento modelo 3D x construído



Fonte: Elaboração própria.

O sistema é composto por uma haste de aproximadamente 80 mm de comprimento, com um apalpador em uma das extremidades. Na outra extremidade, foi fixado com cola rígida um potenciômetro deslizante linear de $100\text{ K}\Omega$, que fica preso ao corpo plástico do transdutor e possui capacidade de medição de 55 mm. Para evitar histerese mecânica, utilizou-se molas como elemento de tração. A haste e o mancal utilizados, foram reaproveitados de um relógio comparador para conferir ao sistema uma maior precisão mecânica e o corpo do transdutor foi impresso em polímero PLA por uma impressora 3D. O percurso útil do sensor é de aproximadamente 35 mm.

5.2 Módulo de aquisição e transmissão de sinais

O sistema de aquisição e transmissão de dados utilizado, foi um equipamento comercial da marca LEsense, fabricado pelo Grupo Lógica-e. Este equipamento realiza a leitura de dados através de entradas analógicas e digitais, enviando todas as informações para um banco de dados remotamente, possibilitando a integração a diversos softwares para coleta inteligente de dados.

Os equipamentos LEsense possuem dois modos de transmissão dos dados coletados em campo para o servidor remoto, sendo WiFi ou GPRS. Para aplicações onde sejam necessários muitos pontos de leitura, é possível criar uma rede privada sem fio entre os dispositivos LEsense, onde um será o concentrador e responsável pelo envio dos dados para a nuvem, enquanto os outros serão apenas dispositivos coletores, ampliando assim o alcance e a capacidade de leitura.

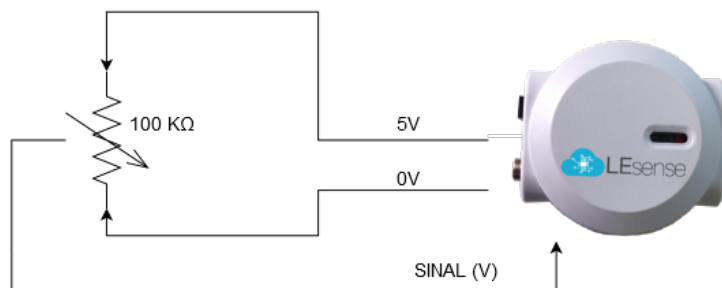
Para desenvolvimento deste sistema de monitoramento foi utilizado um dispositivo com transmissão WiFi, modelo LS2-WiFi, que possui as seguintes características:

- Conector 2 vias: alimentação do equipamento 5V e 2A;
- Conector 4 vias: duas saídas tipo contato seco;
- Conector 5 vias: alimentação em 5V, uma entrada analógica de 0 a 10 V, duas entradas/saídas digitais em 5V;
- Conector 6 vias: alimentação em 5V, saídas/entradas em 5V.

O sistema possui bateria interna de 2600 mA/h e capacidade de armazenar 50 mil eventos, que equivalem a aproximadamente 1 MB.

O transdutor foi colocado no conector de 5 vias, onde se utilizou a alimentação de 5V para energizar o potenciômetro e a entrada analógica para realizar as leituras. O circuito de leitura é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Arranjo de leitura



Fonte: Elaboração própria.

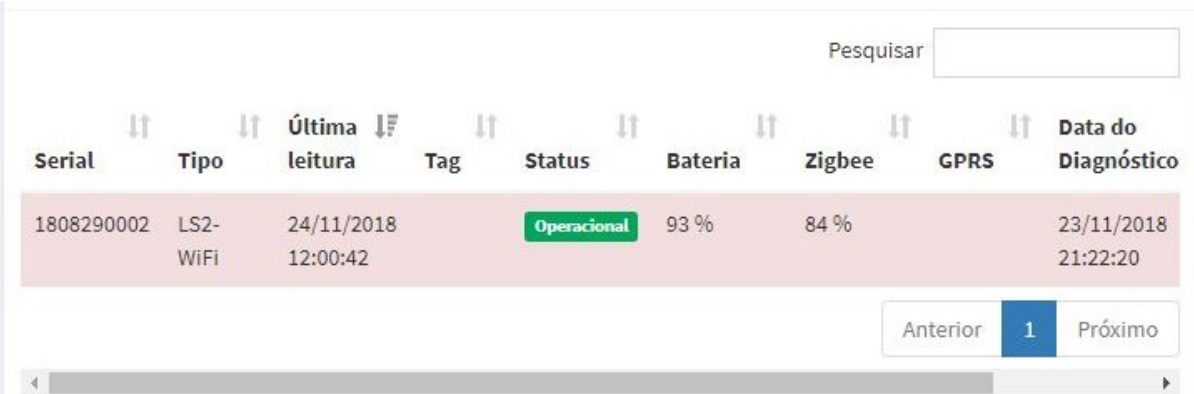
Internamente, através de um divisor resistivo, o sinal de leitura passa por um

amplificador operacional e por um filtro de ruído que realizam o condicionamento do sinal para que ele possa chegar no microcontrolador e ser enviado para os servidores remotos via internet.

5.3 Software e interface de aplicação

O software online que realiza a interface com o servidor remoto, disponibiliza as informações enviadas pelo equipamento ao servidor e possibilita o envio de comandos de configuração para o equipamento, sendo acessado mediante login e senha em <http://uselesense.com.br/>. Na página inicial é possível verificar o número de equipamentos disponíveis, modelo, última leitura e alguns status, como nível de bateria (Figura 22).

Figura 22 – Página inicial uselesense



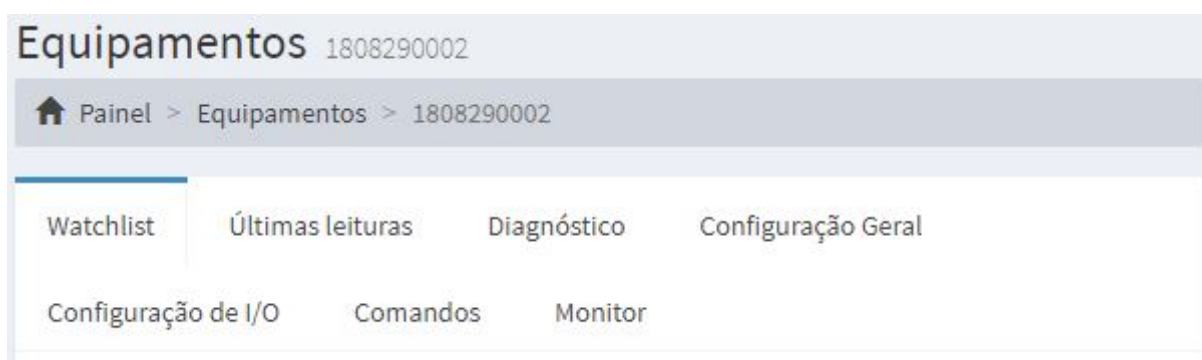
The screenshot shows the main page of the uselesense web application. At the top right, there is a search bar labeled 'Pesquisar'. Below it is a table with the following columns: Serial, Tipo, Última leitura, Tag, Status, Bateria, Zigbee, GPRS, and Data do Diagnóstico. A single row of data is visible, representing equipment 1808290002, which is 'Operacional' (Operational) with a battery level of 93% and Zigbee signal of 84%. The status 'Operacional' is highlighted in a green box. At the bottom right of the table, there are navigation buttons: 'Anterior', '1' (selected), and 'Próximo'. A scrollbar is visible at the bottom of the table area.

Serial	Tipo	Última leitura	Tag	Status	Bateria	Zigbee	GPRS	Data do Diagnóstico
1808290002	LS2-WiFi	24/11/2018 12:00:42		Operacional	93 %	84 %		23/11/2018 21:22:20

Fonte: <https://lesense.logicae.com.br>.

Na aba equipamento é possível verificar algumas informações, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Abas de configuração Web LEsense



Fonte: <https://lesense.logicae.com.br>.

Na aba Watchlist, é possível verificar as informações sobre as entradas do equipamento, que tipo de dado está sendo lido, a última leitura realizada e o valor lido.

Na aba Últimas leituras, se tem acesso a lista de leituras realizadas pelo equipamento, onde pode ser visualizado a data de coleta, qual a entrada do equipamento está sendo utilizada, o tipo de dado que se está lendo e o valor lido, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Aba últimas leituras Web LEsense



Data coleta	Data envio	Sensor	Tipo	Tags	Valor
23/11/2018 21:47:42	23/11/2018 21:48:16	0	Voltage		1.475
23/11/2018 21:47:12	23/11/2018 21:47:16	0	Voltage		1.475
23/11/2018 21:46:42	23/11/2018 21:47:16	0	Voltage		1.475

Fonte: <https://lesense.logicae.com.br>.

Já na aba diagnóstico, é possível verificar o status da bateria e também as chances de conexão com outros equipamentos em caso de utilizá-los em rede.

Nas abas de configuração, pode-se configurar os tempos de aquisição e envio dos dados, assim como, ajustar as configurações de cada entrada do LEsense, informando que tipo e qual o formato do dado que será lido.

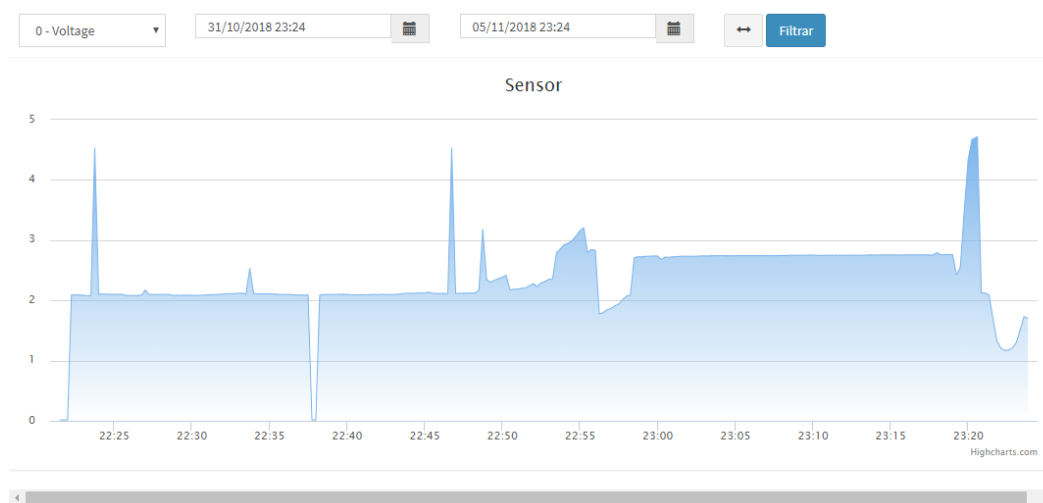
Na aba monitor, é apresentado o histórico de leitura em formato gráfico, de maneira que possa se avaliar as leituras em relação as datas de aquisição, conforme pode ser visto na Figura 25.

Todos os dados que são apresentados na interface de aplicação são exatamente os dados lidos pelo equipamento e enviados ao servidor remoto. Para que fosse possível visualizar os dados já formatados para deslocamento em milímetros, foi desenvolvido uma aplicação dedicada que será apresentada a seguir.

5.4 Aplicação móvel para o monitoramento remoto

A aplicação móvel foi desenvolvida em parceria com o departamento de engenharia do Grupo Logica-e, dentro do sistema de gestão de equipamentos e operações, para uma aplicação dedicada ao monitoramento de estruturas. As informações coletadas pelo coletor de dados e enviados ao servidor remoto, são apresentadas nesta aplicação já formatada, para que forneça valores já convertido em deslocamento (mm).

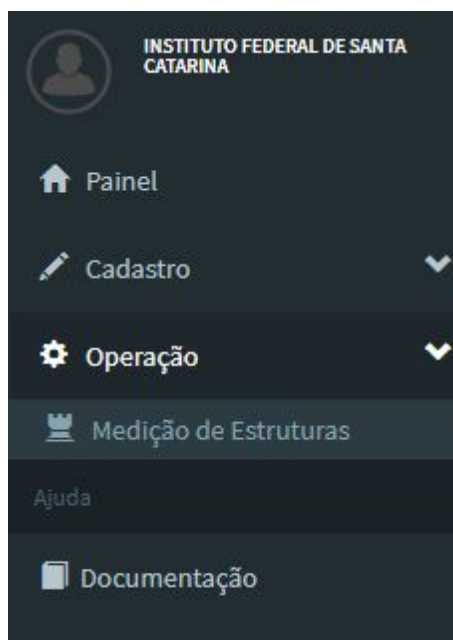
Figura 25 – Monitor LEsense



Fonte: <https://lesense.logicae.com.br>.

É possível acessar a plataforma por meio de um login e senha. Para facilitar a navegação, foi criada uma nova aba no menu principal da página e para acessar basta clicar em “Operações” e depois “Medição de estruturas” (Figura 26).

Figura 26 – Menu principal



Fonte: <http://geo.cianove.com.br>.

Dentro da aba “Medição de estrutura” foi criada outras três abas, para simplificar o acesso as informações, iniciar uma nova medição, medições em andamento e medições já concluídas (Figura 27).

Ao clicar em “Nova medição de estrutura”, é possível cadastrar um novo ciclo de medição. Nesta aba, foi criado campos para descrição da estrutura a ser medida, cliente proprietário ou responsável pela estrutura e um campo para seleção do equipamento utilizado para a medição para que se possa ter um histórico das medições realizadas (Figura 28).

Figura 27 – Medição de estruturas

Fonte: <http://geo.cianove.com.br/>.

Figura 28 – Nova medição de estrutura

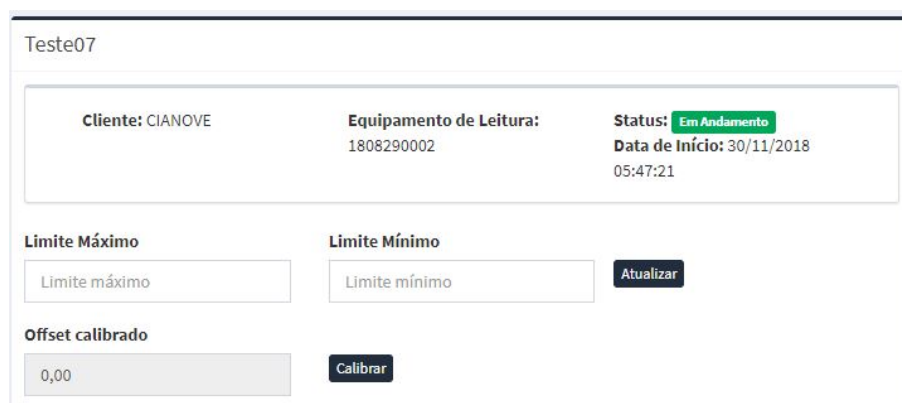
Fonte: <http://geo.cianove.com.br/>.

Assim que preenchido os campos, basta clicar em “Iniciar medição” para ser redirecionado para página de medição (Figura 29).

Como podemos ver na Figura 29, no cabeçalho contém as informações de cadastro e logo abaixo, dois campos para que o operador possa definir os limites máximos e mínimos. Estes limites referem-se aos limites máximos de deslocamento em milímetros que a estrutura podem alcançar e são utilizados como marcadores no

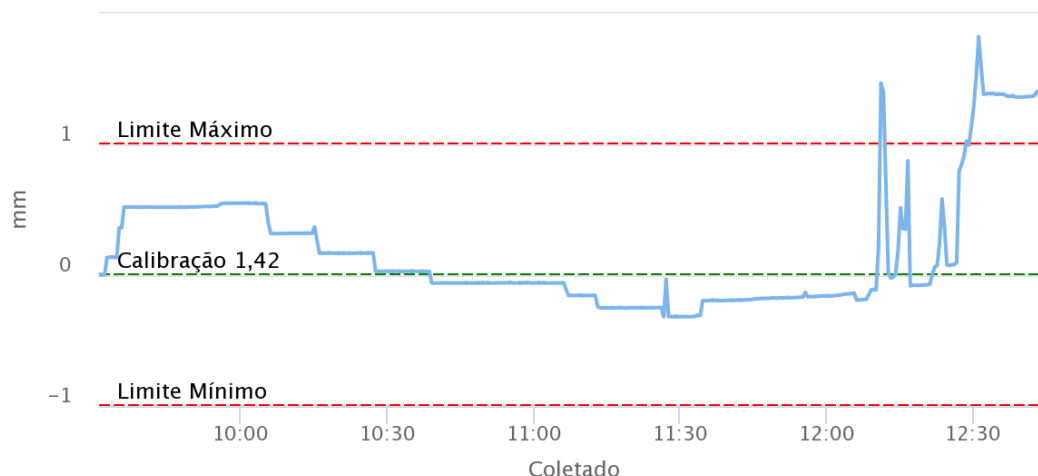
gráfico para facilitar a interpretação das leituras (Figura 30). Assim que definido os limites, basta clicar em “Atualizar” e depois em “calibrar”, para que a aplicação busque no servidor remoto a próxima leitura enviada pelo equipamento e considere esta como ponte de zero para iniciar a medição. Para este procedimento o equipamento já deve estar ligado, configurado em uma rede WiFi e com o sensor em posição de zero.

Figura 29 – Início de medição



Fonte: <http://geo.cianove.com.br/>.

Figura 30 – Gráfico de medições



Fonte: <http://geo.cianove.com.br/>.

Após iniciada a medição, todos os dados coletados pelo equipamento e enviados ao servidor são apresentados pela aplicação em formato gráfico (Figura 30) e em uma lista de últimas leituras (Figura 31). Tanto o gráfico como a lista de últimas leituras podem ser exportados, em qualquer momento durante as medições ou após finalizadas, nos principais formatos utilizados para imagem e tabela.

Para finalizar o monitoramento da estrutura, basta clicar em “Finalizar medição”, que aparece no canto inferior direito da página, após o início das medições.

Em medições abertas, é possível verificar o andamento das medições que não foram encerradas. É possível alterar os limites, inferior e superior, e acompanhar o monitoramento das estruturas em tempo real, tendo acesso as informações apresentadas na Figura 29, 30, 31. O período de atualização dos dados fica dependente do tempo de coleta e de envia pré-ajustados no equipamento.

Figura 31 – Lista de últimas leituras

Ponto	Leitura	Offset	Valor	Data da Coleta
780	2,83	1,42	1,41	27/11/2018 12:45:39
779	2,82	1,42	1,40	27/11/2018 12:45:24
778	2,82	1,42	1,41	27/11/2018 12:45:09
777	2,82	1,42	1,41	27/11/2018 12:44:54
776	2,83	1,42	1,41	27/11/2018 12:44:39

Fonte: <http://geo.cianove.com.br/>.

Em medições concluídas é possível verificar todas as medições que já foram finalizadas Figura 32.

Figura 32 – Medições finalizadas

Medições concluídas				
10	resultados por página	Pesquisar		
Descrição	Cliente	Equipamento	Data de Conclusão	Ações
Estabilidade	CIANOVE	1808290002	30/11/2018 02:24:21	
Teste 1	CIANOVE	1808290002	27/11/2018 12:14:43	
Teste01	CIANOVE	1808290002	28/11/2018 21:23:53	

Fonte: <http://geo.cianove.com.br/>.

Para acessar as informações de uma medição finalizada, basta clicar no ícone da coluna “Ações” (Figura 32) que o gráfico dos pontos de deslocamento medidos ao longo do tempo poderá ser analisado, juntamente com as últimas medições realizadas.

Esta aplicação foi utilizada para realizar a calibração e avaliação de estabilidade temporal do sistema de monitoramento, que será detalhada no Capítulo 6

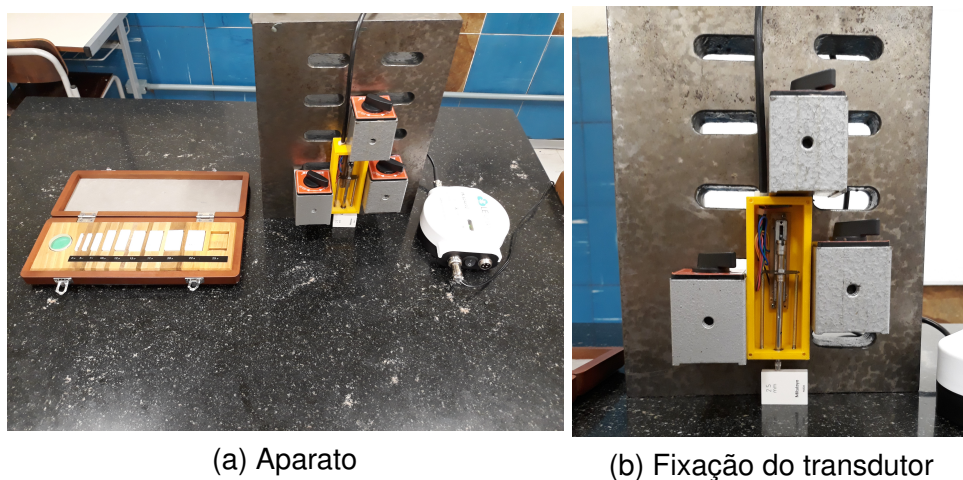
6 VALIDAÇÃO METROLÓGICA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Para que o monitoramento utilizando o sistema desenvolvido possa ser realizado com segurança, se faz necessário a validação metrológica do sistema. Desta forma é muito importante testar e avaliar a confiabilidade metrológica do funcionamento do sistema.

6.1 Determinação da curva de resposta do transdutor de deslocamento

Para o levantamento da curva de resposta do transdutor do sistema de medição foram realizados testes de deslocamento do sensor, utilizando-se como mensurando, um conjunto de blocos padrão de cerâmica Mitutoyo, serial 968054, variando o deslocamento de 0 mm até 25 mm, em 10 diferentes pontos (2.5, 5.1, 7.7, 10.3, 12.9, 15.0, 17.6, 20.2, 22.8 e 25). A Figura 33, mostra o aparato montado para levantamento da curva do sensor. Utilizou-se uma cantoneira de aço para apoio do transdutor e com bases magnéticas fixou-se o transdutor, de modo que ele não se movesse durante as medições.

Figura 33 – Levantamento da curva de resposta do transdutor



Fonte: Elaboração própria.

O ensaio foi realizado com 10 medições repetidas em cada bloco padrão. Foram efetuados 10 ciclos de ensaios e os valores encontrados estão apresentados na

Tabela 1 e na Tabela 2, onde o padrão representa a dimensão dos blocos padrões em milímetros e os valores medidos em volts.

Tabela 1 – Padrão mm x Valor medido em V (P1 A P5)

Padrão (mm)	Valores medidos (V)				
	P1	P2	P3	P4	P5
0,00	1,7750	1,7725	1,7725	1,7725	1,7725
2,50	1,6900	1,6900	1,6925	1,6900	1,6900
5,10	1,6100	1,6100	1,6100	1,6125	1,6125
7,70	1,5325	1,5350	1,5325	1,5350	1,5350
10,30	1,4725	1,4700	1,4725	1,4725	1,4725
12,90	1,4125	1,4125	1,4100	1,4125	1,4125
15,00	1,3625	1,3625	1,3625	1,3625	1,3625
17,60	1,3050	1,3075	1,3050	1,3050	1,3050
20,20	1,2500	1,2500	1,2525	1,2500	1,2500
22,80	1,2000	1,2025	1,2025	1,2025	1,2025
25,00	1,1625	1,1625	1,1625	1,1600	1,1625

Fonte: Elaboração própria.

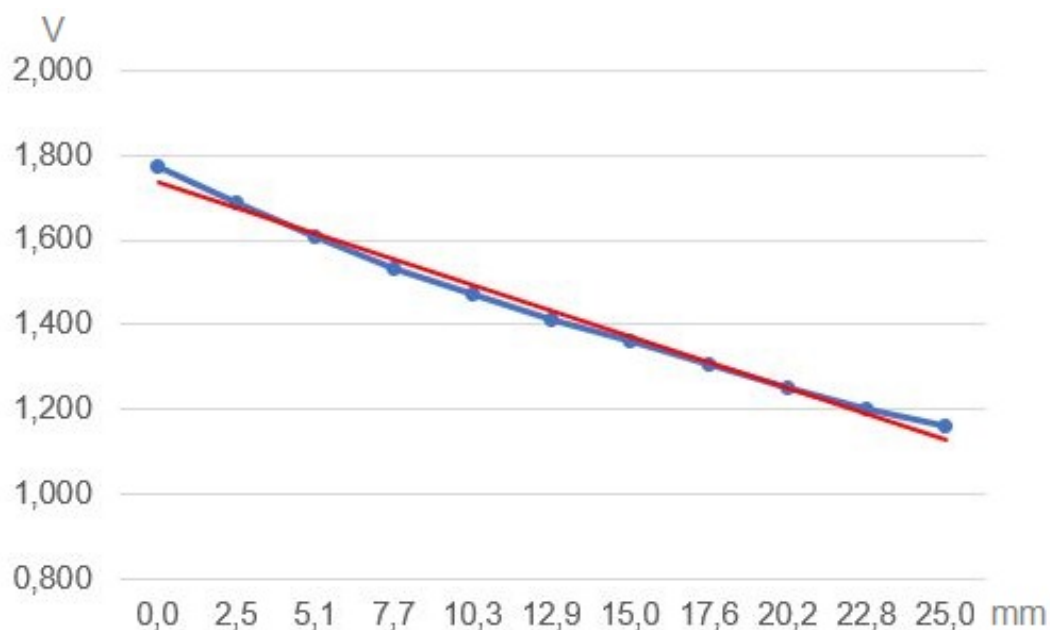
Tabela 2 – Padrão mm x Valor medido em V (P6 A P10)

Padrão (mm)	Valores medidos (V)					Média
	P6	P7	P8	P9	P10	
0,00	1,7750	1,7725	1,7725	1,7725	1,7750	1,7725
2,50	1,6900	1,6900	1,6900	1,6900	1,6925	1,6900
5,10	1,6100	1,6100	1,6100	1,6100	1,6100	1,6100
7,70	1,5350	1,5350	1,5325	1,5350	1,5325	1,5350
10,30	1,4725	1,4700	1,4725	1,4725	1,4700	1,4725
12,90	1,4100	1,4125	1,4125	1,4125	1,4100	1,4125
15,00	1,3625	1,3625	1,3625	1,3625	1,3625	1,3625
17,60	1,3050	1,3050	1,3075	1,3050	1,3050	1,3050
20,20	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500
22,80	1,2025	1,2025	1,2025	1,2025	1,2025	1,2025
25,00	1,1600	1,1600	1,1625	1,1600	1,1600	1,1613

Fonte: Elaboração própria.

A partir da análise da Tabela 1 e da Tabela 2, gerou-se o gráfico apresentado na Figura 34, que apresenta a curva de resposta real, em V/mm. Pode-se constatar que a resposta não é perfeitamente linear e por isso foi realizado uma aproximação linearizada da curva de resposta, que também pode ser visualizada no gráfico.

Figura 34 – Linearização da curva de resposta



Fonte: Elaboração própria.

Com a curva linearizada, calculou-se a equação da curva de resposta do transdutor, que foi caracterizada como:

$$V_m = -0,024.D_c + 1,739 \quad (6.1)$$

onde:

V_m - tensão medida

D_c - deslocamento calculado

logo:

$$D_c = \frac{V_m - 1,739}{-0,024} \quad (6.2)$$

A partir da Equação 6.2, calculou-se a média linearizada, apresentada na terceira coluna da Tabela 3.

O erro de linearidade é a média dos valores coletados pelo coletor de dados, menos a média linearizada. A partir da análise dos dados da Tabela 1 podemos perceber que o transdutor tem boa repetibilidade, aliado a um erro de linearidade baixo que não superior a 2% em nenhum dos pontos, como podemos verificar na Tabela 3. Assim implementou-se, a Equação 6.2 como equação padrão para conversão dos

dados adquiridos pelo transdutor de deslocamento, para que os dados recebidos na página de aplicação, já apresentem os valores em milímetros.

Tabela 3 – Média linearizada e erro de linearidade

Padrão	Média	Média linearizada	Erro de linearidade	Erro %
0,0	1,773	1,739	0,034	2%
2,5	1,691	1,679	0,012	1%
5,1	1,611	1,616	-0,006	0%
7,7	1,534	1,553	-0,019	1%
10,3	1,472	1,491	-0,019	1%
12,9	1,412	1,428	-0,016	1%
15,0	1,363	1,377	-0,015	1%
17,6	1,306	1,314	-0,009	1%
20,2	1,250	1,252	-0,001	0%
22,8	1,202	1,189	0,014	1%
25,0	1,161	1,136	0,026	2%

Fonte: Elaboração própria.

6.2 Calibração do sistema de monitoramento

Para calibrar o sistema de monitoramento, utilizou-se o mesmo arranjo de fixação dos componentes utilizado para levantamento da curva de resposta do sensor (Figura 33). Para a calibração foram realizados 10 ciclos de medição em cada um dos blocos padrões (Figura 35).

Figura 35 – Roteiro calibração do Sistema de medição



Fonte: Elaboração própria

Os dados apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5, foram coletados na página de aplicação do sistema de monitoramento, que utiliza a Equação 6.2, para transformação dos dados lido em V pelo equipamento coletor para mm.

Tabela 4 – Ciclos de calibração (Ciclo 1 a 5)

Padrão	Ciclo01	Ciclo02	Ciclo03	Ciclo04	Ciclo05
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,1042
2,5000	3,4375	3,5417	3,4375	3,5417	3,5417
5,1000	6,9792	6,9792	6,8750	6,9792	6,9792
7,7000	10,0000	10,2083	10,1042	10,3125	10,1042
10,3000	12,9167	13,0208	12,9167	12,9167	12,9167
12,9000	15,2083	15,4167	15,3125	15,3125	15,3125
15,0000	17,2917	17,5000	17,3958	17,5000	17,3958
17,6000	19,4792	19,7917	19,6875	19,8958	19,7917
20,2000	21,6667	21,7708	21,9792	21,9792	22,0833
22,8000	23,3333	23,7500	23,9583	24,0625	24,0625
25,0000	25,0000	25,3125	25,3125	25,5208	25,7292

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 – Ciclos de calibração (Ciclo 6 a 10)

Padrão	Ciclo06	Ciclo07	Ciclo08	Ciclo09	Ciclo10
0,0000	0,0000	-0,1042	0,0000	0,0000	0,2083
2,5000	3,5417	3,5417	3,6458	3,6458	3,7500
5,1000	6,9792	6,9792	7,0833	6,9792	7,1875
7,7000	10,2083	10,2083	10,3125	10,4167	10,4167
10,3000	13,0208	13,0208	13,1250	13,2292	13,1250
12,9000	15,5208	15,5208	15,5208	15,7292	15,4167
15,0000	17,5000	17,5000	17,6042	17,7083	17,3958
17,6000	19,8958	20,0000	20,0000	20,2083	19,5833
20,2000	22,1875	22,2917	22,1875	22,5000	21,5625
22,8000	24,1667	24,2708	24,1667	24,3750	23,5417
25,0000	25,9375	25,9375	26,0417	26,1458	24,8958

Fonte: Elaboração própria

Após análise dos dados de calibração, mostrados a cima, estimou-se os erros sistemáticos e aleatórios para que fosse possível calcular a incerteza de medição do sistema de monitoramento.

Primeiro calculou-se a parcela de erros sistemáticos através da Equação 6.2. Os dados são apresentados na Tabela 6.

A estimativa dos erros aleatórios foi calculada a partir do desvio padrão dos resultados obtidos nas 10 repetições. A partir dos desvios-padrão foram calculadas as

repetibilidades em cada posição.

Tabela 6 – Tendência

Padrão (mm)	Média (mm)	Tendência (mm)
0,0000	0,0000	0,00
2,5000	3,5625	1,06
5,1000	7,0000	1,90
7,7000	10,2292	2,53
10,3000	13,0208	2,72
12,9000	15,4271	2,53
15,0000	17,4792	2,48
17,6000	19,8333	2,23
20,2000	22,0208	1,82
22,8000	23,9687	1,17
25,0000	25,5833	0,58

Fonte: Elaboração própria

A repetibilidade foi calculada pela Equação 4.4 e como foram realizadas 10 repetições para a estimativa da tendência, a repetibilidade então se refere à média de 10 repetições. Deste modo a repetibilidade é dividida pela raiz quadrada de 10 para obter os resultados vistos na Tabela 7.

Tabela 7 – Desvio padrão e repetibilidade

Padrão (mm)	Desvio-padrão (mm)	Repetibilidade (mm)
0,0000	0,09	0,06
2,5000	0,10	0,07
5,1000	0,08	0,06
7,7000	0,14	0,10
10,3000	0,11	0,08
12,9000	0,15	0,11
15,0000	0,12	0,09
17,6000	0,22	0,16
20,2000	0,29	0,21
22,8000	0,33	0,24
25,0000	0,44	0,32

Fonte: Elaboração própria

Combinando a repetibilidade e a tendência em cada posição avaliada estimou-se o erro máximo. Nesta análise de incerteza a repetibilidade foi considerada como fonte predominante, visto que a incerteza do bloco-padrão e as incertezas devidas à

resolução de indicação e à temperatura são bem menores do que a fonte de incerteza tipo A. Na Tabela 8 o erro máximo é calculado pela Equação 6.3.

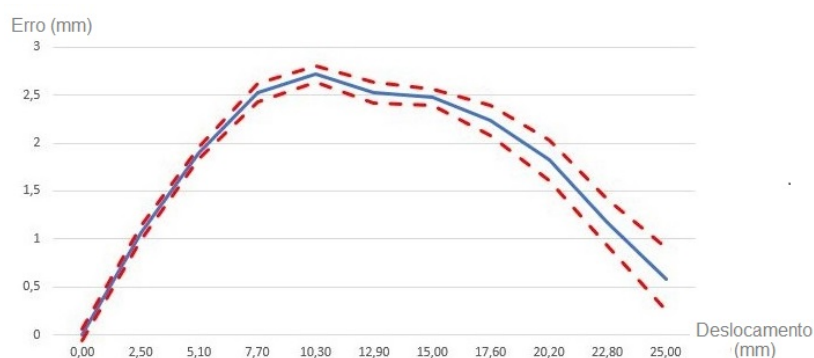
$$ErroMaximo = Tendencia + Repetibilidade \quad (6.3)$$

Tabela 8 – Erro máximo do sistema de medição

Padrão (mm)	Tendência (mm)	Repetibilidade (mm)	Erro Máximo
0,0000	0,00	0,06	0,06
2,5000	1,06	0,07	1,13
5,1000	1,90	0,06	1,96
7,7000	2,53	0,10	2,63
10,3000	2,72	0,08	2,80
12,9000	2,53	0,11	2,64
15,0000	2,48	0,09	2,57
17,6000	2,23	0,16	2,39
20,2000	1,82	0,21	2,03
22,8000	1,17	0,24	1,41
25,0000	0,58	0,32	0,91

Nesta tabela de resultados pode-se observar que os erros ficaram acima de 2 mm em várias posições. Embora este erro seja alto, verifica-se que a maior parcela dos erros é dos erros sistemáticos, passíveis de correção. Caso estes erros sejam compensados, a parcela aleatória dos erros ficou abaixo de 0,5 mm, adequado para o monitoramento da estabilidade de grandes estruturas. O gráfico da Figura 36 mostra que a não linearidade do transdutor é a causa destes erros sistemáticos. A curva central (linha contínua) refere-se à tendência, e as linhas tracejadas que a envolvem referem-se à repetibilidade.

Figura 36 – Curva de erros do sistema de medição

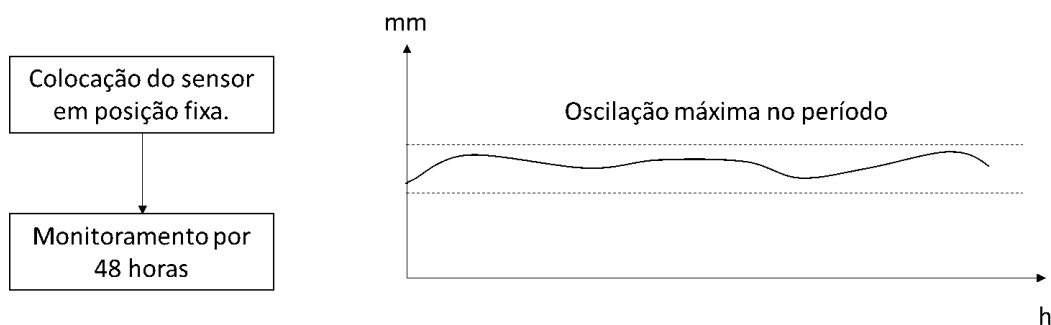


Fonte: Elaboração própria.

6.3 Ensaio de avaliação da estabilidade temporal do sistema de monitoramento

Para analisar a estabilidade do sistema, foi realizado um deslocamento do apalpador do sensor, mantendo-o deslocado em posição fixa por 48 horas, a fim de verificar se há alguma instabilidade de leitura. O conceito do ensaio está ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Conceito do ensaio de estabilidade



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados deste ensaio permitiram observar que o sistema de monitoramento apresentou uma oscilação máxima nos resultados, de 0,48 mm.

Em períodos maiores, o sistema apresenta oscilações cíclicas conforme apresentado na Figura 38. Que podem estar relacionados a características elétricas do transdutor, como o aquecimento excessivo do potenciômetro deslizante ou ainda por características do coletor e transmissor de dados que não puderam ser percebidas nos ensaios de curta duração.

Figura 38 – Ensaio de estabilidade



Fonte: Elaboração própria.

7 CONCLUSÃO

7.1 Desempenho e aplicabilidade do sistema de monitoramento

No Brasil, a qualidade do monitoramento das grandes estruturas é precária, quando se trata de estruturas do Estado, a situação é ainda pior. Falta periodicidade, planejamento e equipamentos que possibilitem o acompanhamento da saúde das estruturas, assim, gasta-se muito na correção dos grandes problemas que poderiam ser minimizados por pouco. Reflexo disso, são os inúmeros acontecimentos que ocorrem, não só no Brasil, como em países da Europa.

Neste trabalho, procurou-se desenvolver uma solução de monitoramento com esta finalidade. O sistema foi desenvolvido, tendo como plataforma de aquisição de sinais um sistema comercial de uma empresa de base tecnológica da grande Florianópolis, parceria deste trabalho.

Os componentes do sistema de medição atenderam satisfatoriamente aos testes e validações realizadas em laboratório. Devido à indisponibilidade e ao alto custo dos transdutores comerciais, optou-se neste trabalho por utilizar um transdutor de baixo custo em desenvolvimento no laboratório de metrologia. Dado o seu estado de operação ainda não otimizado, os erros de medição ficaram altos, mas com predominância dos erros sistemáticos, passíveis de correção. A principal causa destes erros, vem da não linearidade na resposta do transdutor utilizado. Após todos os ensaios realizados com o sistema de monitoramento, podemos analisar com clareza o desenvolvimento do sistema. De acordo com a Tabela 8, a maior incerteza encontra para o sistema de medição é de 2,8 mm com repetibilidade de 0,32 mm.

O módulo de hardware utilizado atendeu plenamente às necessidades dos ensaios e a aplicação web desenvolvida para o monitoramento mostrou-se intuitiva e com fácil usabilidade, permitindo o acompanhamento em tempo real da estrutura, dando possibilidade de incluir os limites para balizarem os dados do gráfico e agilizar as análises. Todos os dados lidos podem ser exportados, assim como as imagens gráficas, possibilitando a inclusão rápida em relatórios.

7.2 Propostas de melhorias do sistema desenvolvido

o Correção dos erros sistemáticos do transdutor empregado neste trabalho, ou a aquisição de um transdutor comercial, de maior exatidão.

o Aperfeiçoamento da aplicação web que possibilite a atualização automática dos dados, para melhorar ainda mais a usabilidade do sistema.

o Integração do sistema de coleta e transmissão de dados com outros sensores que possibilitem diferentes aplicações de monitoramento, como acelerômetros.

- o Realização de testes prolongados, a fim de analisar afundo as instabilidades apresentadas pelo sistema.

- o Realização de testes em campo, para avaliar a robustez do sistema e validar a aplicação web desenvolvida.

REFERÊNCIAS

ABNT. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto armado - procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. 221 p. 29

ABNT. *NBR 8800*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 221 p. 29

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. d. *Fundamentos da Metrologia Científica e industrial*. 1. ed. São Paulo: Manole, 2008. 43, 44

ASHTON, K. That 'internet of things' thing. *RFID Journal*, n. 1, 2009. Disponível em: <<https://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986>>. 39

AZEVEDO, F. *4ª Revolução Industrial e a Transformação Digital*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://info.microsoft.com>>. 39

BARBOSA, A. et al. Topografia para monitoramento de estruturas. *Mundo Geo*, n. 1, 2016. Disponível em: <<https://mundogeo.com/blog/2016/11/09/artigo-topografia-aplicada-ao-monitoramento-de-estruturas-estudo-de-caso-sobre-muro/>>. 35

BELLEI, I. H.; PINHO, F. O.; PINHO, M. O. *Edifícios de Múltiplos Andares em aço*. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008. 29, 30

COELHO, R. M. P. Existe governança das águas no Brasil? estudo de caso: O rompimento da barragem de Fundão, Mariana (MG). *Arquivos do de história natural e jardim botânico*, n. 24, 2015. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/mhnb/wp-content/uploads/2017/02/Vol24n1.pdf>>. 32

COLOMBO, A. B. et al. Ações de Inspeção e Monitoramento Estrutural em Pontes e Viadutos de uma Ferrovia Brasileira. 2014. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos/trab_41.pdf>. 26

DIAS, L. A. d. M. *Estruturas de aço: conceitos, técnicas e linguagem*. 4. ed. São Paulo: Zigurate, 1997. 29

INMETRO. *GUM 2008*: Avaliação de dados de medição - medição - guia para a expressão de incerteza de medição. Rio de Janeiro, 2012. 141 p. 46

ITAIPU. *Segurança da barragem*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/rs2015/pt/seguranca-de-barragem.html>>. 41

KIM, S. et al. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks. *IPSN 2007: Proceedings of the Sixth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, p. 254–263, 05 2007. 36, 37

KRIPKA, M. *Análise estrutural para engenharia civil e arquitetura: estrutura isostática*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2011. 30

LESENSE. *Monitoramento de umidade higrométrica do solo*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/company/lesense-coleta-de-dados-iot/>>. 40

OPSERVICES. *Qual a importância do monitoramento na era da internet das coisas?* [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.opservices.com.br/>>. 39

SANTIAGO E CINTRA. *Como funciona o monitoramento de estruturas?* [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.santiagoecintra.com.br/blog/geo-tecnologias/como-funciona-o-monitoramento-de-estruturas/>>. 32

SENSORWEB. *Monitoramento das Temperaturas no Hospital e Instituto de Pesquisa Oncológico*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://www.sensorweb.com.br/cases/monitoramento-cadeia-frio-icesp/>>. 40

SINAENCO. *Estudo do Sinaenco sobre pontes e viadutos de SP*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://sinaenco.com.br/noticias/estudo-do-sinaenco-sobre-pontes-e-viadutos-de-sp-e-destaque-no-fantastico/>>. 25