



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

MANUELA LUCIANE NOBRE AGUIAR

**SISTEMA DE SENSORES PARA MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO**

**RUSSAS
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A23s Aguiar, Manuela Luciane Nobre.
Sistemas de sensores para monitoramento de estruturas de concreto / Manuela
LucianeNobre Aguiar. – 2023.
82 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará,
Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

1. Sensores. 2. Monitoramento. 3. Concreto. 4. Estrutura. I. Título.

CDD 620

MANUELA LUCIANE NOBRE AGUIAR

SISTEMAS DE SENSORES PARA MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Russas, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Esequiel Fernandes
Teixeira Mesquita

RUSSAS

2023

MANUELA LUCIANE NOBRE AGUIAR

**SISTEMA DE SENSORES PARA MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Ceará (UFC) –
Campus Russas, como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 23/11/2023

BANCA EXAMINADORA

Orientador: _____

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

1º Examinador(a): _____

Prof. Israel Nilton Lopes Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

2º Examinador(a): _____

Prof. Dr. Jerfson Moura Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, meu Senhor e Salvador.
Aos meus pais, Telma Nobre e Luciano Aguiar.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sua presença e amor incondicional em minha vida, que conduz meus passos, que me dá saúde, força e fé para alcançar os planos que ele tem para mim, pelos livramentos que já me deu e por todas as graças alcançadas.

Gratidão a Maria Santíssima, mãe de Deus, por escutar minhas preces e interceder por nós aqui na Terra.

Aos meus pais, Telma Nobre e Luciano Aguiar 'In Memoriam', que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando, incentivando e proporcionando o melhor para o meu desenvolvimento. Sou muito grata a eles pela educação que me deram e por todos os ensinamentos, conselhos e ajudas.

Ao meu avô, 'In Memoriam', Francisco Nobre de Lima, que não media esforços para me ver bem, feliz e sempre me incentivou em toda minha jornada.

Aos meus padrinhos, 'In Memoriam', Heloísa Nobre e Gladstone Nobre, por tudo que já fizeram por mim e por serem exemplos de garra e coragem a minha pessoa.

À minha família, que me encoraja e me apoia pra que tudo dê certo.

A Suellen Nobre, minha prima querida, que desde que nasci sempre cuidou, aconselhou e brigou, quando necessário, pra que eu me tornasse a mulher que sou hoje.

Ao Prof. Dr. Esequiel Mesquita, eterna gratidão a esse Mestre da Engenharia que tenho como exemplo de profissional e pessoa. Professor, meus sinceros agradecimentos por toda paciência, dedicação e conhecimento compartilhado comigo e aos meus colegas. É uma honra tê-lo como orientador e em breve colega de trabalho.

Aos Professores da Universidade, Dr. Jerfson Lima, Ms. Camila Lima, Ms. Andrielle Nascimento, Ms. Daniela Machado, Dr. Markos Freitas, Dra. Mylene Melo e os demais Mestres e Doutores que fizeram parte da minha formação acadêmica, meus sinceros agradecimentos por toda dedicação, disponibilidade, ajuda e aprendizado durante o curso.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos”. (Friedrich Nietzsche)

RESUMO

No âmbito da engenharia civil, a integridade estrutural de construções de concreto é de fundamental importância para garantir a segurança e durabilidade das edificações. Diante desse contexto, o desenvolvimento e implementação de sistemas de sensores para o monitoramento contínuo dessas estruturas têm emergido como uma área de pesquisa crucial. A durabilidade e a segurança de estruturas de concreto são fatores determinantes para a sustentabilidade e longevidade das edificações urbanas. Nesse contexto, emerge a exploração aprofundada do "Sistema de Sensores para o Monitoramento de Estruturas de Concreto". Este tema abrange uma abordagem tecnológica inovadora, na qual sistemas avançados de sensores desempenham um papel crucial na vigilância contínua e diagnóstico precoce de potenciais problemas estruturais. O objetivo deste trabalho é compreender como esses sistemas podem contribuir significativamente para a manutenção preventiva, antecipação de falhas e, conseqüentemente, para a prolongação da vida útil das estruturas de concreto. A partir da metodologia empregada, foi constatada que capacidade de prevenir danos estruturais, otimizar processos de manutenção e, conseqüentemente, economizar recursos, posiciona os sistemas de sensores como ferramentas essenciais para profissionais e pesquisadores engajados na busca por soluções sustentáveis e eficazes.

Palavras-chave: sensores; monitoramento; concreto; estrutura.

ABSTRACT

In the scope of civil engineering, the structural integrity of concrete constructions is of fundamental importance to ensure the safety and durability of buildings. In this context, the development and implementation of sensor systems for the continuous monitoring of these structures have emerged as a crucial research area. The durability and safety of concrete structures are determining factors for the sustainability and longevity of urban buildings. Within this context, there is a deep exploration of the "Sensor System for Concrete Structure Monitoring." This topic encompasses an innovative technological approach, in which advanced sensor systems play a crucial role in continuous surveillance and early diagnosis of potential structural problems. The aim of this work is to understand how these systems can significantly contribute to preventive maintenance, anticipation of failures, and consequently, to the extension of the lifespan of concrete structures. Based on the methodology employed, it was found that the ability to prevent structural damage, optimize maintenance processes, and consequently, save resources, positions sensor systems as essential tools for professionals and researchers engaged in the search for sustainable and effective solutions.

Keywords: sensors; monitoring; concrete; structure.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Contextualização	11
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivos	14
1.4 Objetivos específicos	14
2 METODOLOGIA.....	15
3 ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	16
3.1 Concreto armado.....	16
3.1.1 Componentes do concreto armado	17
3.1.2 Características mecânicas do concreto armado.....	18
3.2 Manifestações patológicas	19
3.2.1 Durabilidade do concreto.....	21
3.2.2 Deterioração do concreto armado	24
3.2.3 Principais manifestações patológicas que ocorrem no concreto	24
3.2.4 Principais patologias que ocorrem no aço.....	28
3.3 Inspeção de estruturas de concreto	29
4 MONITORAMENTO ESTRUTURAL	33
4.1 Processo de monitoramento.....	39
4.1.1 Transdutor	40
4.1.2 Aquisição de Dados.....	41
4.1.3 Transmissão dos Dados.....	42
4.1.4 Análise e Interpretação dos Dados	44
4.1.5 Fases de aplicação	45
4.2 Sensores	47

4.2.1 Definição e características	47
4.2.2 Tipos de sensores	49
4.2.3 Funcionamento básico dos sensores	66
5 ALGUNS ESTUDOS COM O USO DE SENSORES.....	71
5.1 Monitoramento da temperatura e de deformações relativas induzidas por corrosão em uma viga de concreto armado (GUIMARÃES, 2022)	71
5.2 Análise do desempenho térmico de habitações de interesse social construídas em paredes de concreto: um estudo de caso em Tucuruí – PA (SANTOS; GOUVEIA, 2018).....	73
5.3 Procedimento de instrumentação de um viaduto de concreto com sensores <i>strain gauges</i> – Estudo de caso (GARCIA <i>et al</i> , 2020)	77
6 RESULTADOS	83
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, a ocorrência de desastres naturais em todo o mundo evidenciou a necessidade de ter esquemas de monitoramento da saúde estrutural, permitindo a avaliação contínua da integridade das estruturas civis e infraestruturas, visando evitar potenciais perdas econômicas e humanas, além de possibilitar a aplicação de novas tecnologias de detecção e algoritmos de processamento de sinal.

Um passo importante em uma estratégia de monitoramento da saúde estrutural é a seleção apropriada do sensor usado para medir a variável física necessária (De Castro; Rubio, 2018). Isso se tornou crucial nos últimos anos, tendo em vista da ocorrência crescente de desastres naturais em todo o mundo, que tem destacado a necessidade de esquemas de monitoramento da saúde estrutural. Esses esquemas possibilitam a avaliação contínua da integridade das estruturas civis e infraestruturas, visando evitar potenciais perdas econômicas e humanas, além de permitir a aplicação de novas tecnologias de detecção e algoritmos de processamento de sinal.

Conforme Rocha (2021), o monitoramento das estruturas de concreto é uma tecnologia emergente que leva ao desenvolvimento de sistemas capazes de monitorar continuamente estruturas quanto a danos para melhorar a segurança e reduzir os custos do ciclo de vida. O monitoramento das estruturas de concreto envolve a integração de um ou mais métodos de teste não destrutivos em um veículo para facilitar a detecção de danos rápida e precisa com o mínimo de intervenção humana.

Além disso, o monitoramento das estruturas de concreto é usado para triagem rápida de condições e visa fornecer, em tempo quase real, informações confiáveis sobre a integridade da estrutura. A inspeção de infraestrutura, como rede viária e pontes, desempenha um papel fundamental na segurança pública no que diz respeito ao acúmulo de danos de longo prazo e aos cenários pós-eventos extremos (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021). Como parte dos rápidos desenvolvimentos em tecnologias orientadas a dados que estão transformando muitos campos da engenharia e da ciência, Sousa (2021) afirma que as técnicas de aprendizado de máquina e visão computacional são cada vez mais capazes de diagnosticar e

classificar padrões de forma confiável em dados de imagem, o que tem aplicações claras em contextos de inspeção.

Sensores de monitoramento de estruturas de concreto desempenham um papel crucial na engenharia moderna, garantindo a segurança, durabilidade e eficiência de edifícios, pontes, barragens e outras infraestruturas de concreto. Os sensores desempenham um papel crucial na garantia da segurança estrutural em construções de concreto. Ao possibilitarem o monitoramento contínuo, esses dispositivos oferecem a capacidade de detectar precocemente quaisquer alterações nas condições das estruturas. Seja fissuras, deformações ou corrosão, os sensores alertam para sinais de desgaste, permitindo intervenções antes que problemas significativos surjam.

Tal antecipação é fundamental para a prevenção de falhas estruturais, proporcionando oportunidades de manutenção e reparo antes que a integridade da construção seja comprometida. Assim, os sensores não apenas asseguram a segurança dos ocupantes, mas também contribuem para a durabilidade e sustentabilidade das estruturas de concreto, minimizando riscos e otimizando a gestão de infraestrutura.

Em situações de desastres naturais, como terremotos ou enchentes, os sensores podem alertar sobre danos estruturais iminentes, ajudando a proteger vidas e propriedades. A utilização de sensores avançados, como os baseados em Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial, possibilita análises mais detalhadas e precisas, impulsionando a inovação na indústria da construção. Em muitas jurisdições, a monitorização das estruturas é um requisito legal para garantir a conformidade com normas de segurança e regulamentos governamentais.

Nos últimos anos, a incidência de desastres naturais em escala global destacou a necessidade de implementar sistemas de monitoramento estrutural contínuo. Essa prática visa avaliar constantemente a integridade de construções civis e infraestruturas, prevenindo perdas econômicas e humanas. A escolha apropriada de sensores é crucial nesse contexto, permitindo a aplicação de novas tecnologias de detecção.

O monitoramento das estruturas de concreto, uma tecnologia emergente, utiliza métodos não destrutivos para melhorar a segurança, reduzir custos e integrar sistemas de detecção avançados. Além de possibilitar a detecção rápida de danos,

esses sistemas oferecem informações quase em tempo real sobre a integridade das estruturas, facilitando uma gestão eficaz dos recursos.

Em situações de desastres naturais, os sensores alertam sobre danos iminentes, protegendo vidas e propriedades. A utilização de tecnologias como IoT e inteligência artificial impulsiona a inovação na construção, sendo, em muitas jurisdições, um requisito legal para garantir conformidade com normas de segurança. Em última análise, os sensores desempenham um papel vital na preservação da segurança pública, na economia de recursos e na promoção da inovação na engenharia civil, sendo essenciais para garantir que as estruturas de concreto estejam sempre em condições ideais, independentemente das pressões externas ou do desgaste natural ao longo do tempo.

Nesta abrangente revisão bibliográfica, foram minuciosamente abordados os principais e mais comumente empregados sensores destinados ao monitoramento de estruturas de concreto. O escopo envolveu uma análise detalhada sobre suas aplicações específicas, destacando como esses dispositivos são empregados com eficácia em diferentes tipos de estruturas. Além disso, foram discutidas as situações em que esses sensores demonstram maior eficiência na detecção e avaliação de patologias estruturais, proporcionando uma compreensão aprofundada sobre a sua utilidade e adequação em cenários diversos. Essa revisão visa oferecer uma visão abrangente e informada sobre a aplicabilidade prática desses sensores, contribuindo para uma compreensão mais sólida e orientada no âmbito do monitoramento estrutural.

1.2 Justificativa

A instalação de sensores em estruturas permite realizar monitoramento de curto ou longo prazo do movimento e deformação estrutural; limitar as interrupções na operação de uma estrutura após um evento climático ou acidente; analisar e entender o comportamento de uma estrutura; prolongar a vida útil das estruturas, otimizar seus custos de manutenção e gerenciar a sustentabilidade e resiliência dos ativos (Garcia *et al.*, 2021).

O impacto econômico da deficiência estrutural é duplo, agindo direta e indiretamente. Por um lado, o impacto direto se reflete nos custos de reconstrução,

enquanto o impacto indireto envolve perdas nos demais ramos da economia. O colapso total de monumentos históricos, como antigas pontes de pedra e catedrais, representam uma perda cultural irreparável para a sociedade. Aprender como uma estrutura funciona em condições reais ou de laboratório ajudará a projetar estruturas melhores para o futuro.

As estruturas civis modernas exigem uma avaliação contínua de sua integridade estrutural para evitar falhas catastróficas que podem levar a perdas econômicas e humanas potenciais. Nesse sentido, o conhecimento de esquemas de monitoramento das estruturas de concreto, em particular de sensores e algoritmos de processamento de sinais, tornou-se uma necessidade para engenheiros civis e estruturais.

1.2 Objetivos

O objetivo geral é apresentar os principais tipos sensores e sua importância para monitoramento de estruturas de concreto.

1.4 Objetivos específicos

- Identificar os sensores de monitoramento das estruturas de concreto;
- Explicar os principais tipos de sensores de monitoramento das estruturas de concreto;
- Apresentar os procedimentos de uso dos sensores de monitoramento de estruturas de concreto e as suas funcionalidades.

2 METODOLOGIA

A revisão bibliográfica conduzida nesta pesquisa compreendeu uma análise aprofundada de estudos científicos, artigos acadêmicos, livros e documentos técnicos relacionados ao uso de sensores no monitoramento de estruturas de concreto. Aspectos relevantes, como princípios de funcionamento de sensores, tipos de sensores utilizados em aplicações estruturais, e métodos de coleta e análise de dados, foram examinados para fornecer uma base sólida para o desenvolvimento da metodologia proposta. Na construção desse estudo também foram consultados vários trabalhos correlatos sobre sistemas de monitoramento de sensores, desde estudos de casos, onde há a aplicação desses sistemas em construções reais, até pesquisas mais destinadas ao desenvolvimento de sensores.

Após essa primeira etapa, foram realizadas pesquisas sobre sistemas de monitoramento de estruturas de concreto armado. Inicialmente tratou-se de apresentar o processo de monitoramento por meio da compreensão dos elementos básicos que o formam. Também procurou-se trazer informações sobre os momentos em que se deve aplicar o sistema. Por fim, os sensores para acompanhamento de estruturas foram definidos e suas principais características apresentadas ainda nessa etapa, com ênfase aos principais tipos de sensores no mercado, suas particularidades, composições, funcionamento básico e aplicação.

A metodologia proposta neste trabalho buscou preencher lacunas existentes no monitoramento de estruturas de concreto, oferecendo uma abordagem abrangente e tecnologicamente avançada. A revisão bibliográfica desempenha um papel fundamental na definição dos passos metodológicos, garantindo que o sistema de sensores seja baseado nas melhores práticas e nas últimas inovações no campo. Este estudo contribui para o avanço do conhecimento e para a aplicação prática de soluções eficazes no monitoramento estrutural, promovendo a segurança e a durabilidade das construções de concreto

3 ESTRUTURAS DE CONCRETO

Para melhor compreensão sobre monitoramento de estrutura, inicialmente buscou-se abordar informações referentes inspeção geral de estruturas, sobretudo, quais aspectos levar em consideração em sua observação. Além disso, neste capítulo foram apresentados também os danos mais comuns em estruturas de concreto armado, onde ocorrem e as suas principais causas. E por fim as consequências desses danos, levando-se em conta parâmetros como a segurança dos usuários, do meio e da própria estrutura.

3.1 Concreto armado

Atualmente, para diversos tipos de estruturas, o concreto é fruto de um trabalho de incontáveis pessoas, que durante vários anos observaram a natureza para poder aprimorar técnicas e teorias como forma de construção (Kaefer, 1998).

As primeiras invenções de concreto armado são atribuídas ao francês Monier, que construiu vasos de flores de areia e cimento armados de arame e em 1867 com a construção destes vasos Monier conseguiu sua primeira patente, se estendendo para outros diversos tipos de construção, como exemplo em 1873 para pontes e 1875 para escadas (Giongo, 2007).

No Brasil, ainda segundo Giongo (2007), a empresa alemã Wayss & Freytag gerou o desenvolvimento do concreto armado, a partir do ano de 1913, juntamente com o engenheiro brasileiro Emílio Baumgart, responsável por colecionar vários recordes, em níveis mundiais. Pode se citar o edifício “A Noite” no Rio de Janeiro que na época foi o edifício em concreto armado mais alto do mundo, com 22 pavimentos. O concreto armado é o mais utilizado no Brasil na construção de estruturas de edificações e em grandes obras viárias, haja vista que, as estruturas de concreto armado em ambientes não agressivos, duram praticamente em torno de cem anos sem precisar de manutenção (Botelho, 2006).

De acordo com Andolfato (2002), as vantagens do concreto armado são: ser derivado de materiais econômicos e disponíveis com abundância no globo terrestre, ser moldável, o que permite uma flexibilidade na obra, emprego de mão de obra não qualificada e utilização de equipamentos simples, processo construtivo de

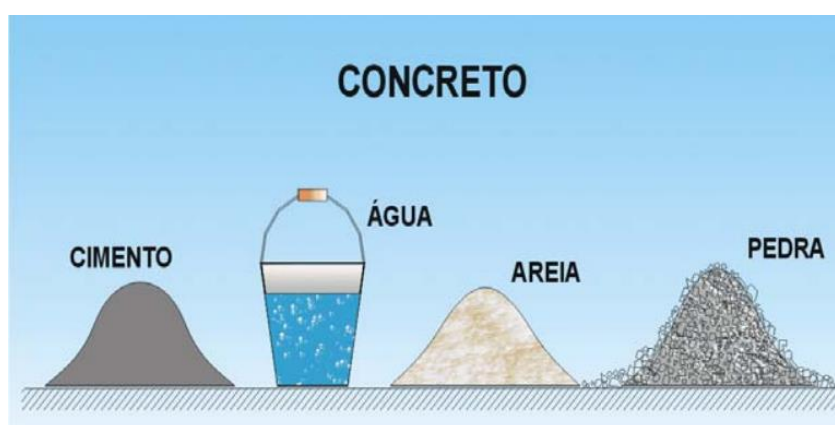
fácil entendimento, concreto durável que serve para proteger a armadura de corrosão, gastos em manutenção preventiva pequenos comparados com outros tipos de estruturas, possui comportamento satisfatório contra choques e vibrações normais de uso, efeitos térmicos, atmosféricos e a desgastes mecânicos, facilidade e economia na construção de estruturas contínuas, sem juntas em pequenas estruturas ou em planos de curta dimensão.

Porém entre as suas desvantagens estão o peso próprio elevado, as reformas e adaptações de difícil execução, o custo alto das formas para moldagem, e a precisão no posicionamento das armaduras (Andolfato, 2002).

3.1.1 Componentes do concreto armado

O concreto armado desempenha um papel fundamental nas estruturas, sendo projetado para resistir aos esforços de tração. Essa resistência é alcançada por meio da incorporação de armaduras de aço ao concreto (constituído, basicamente, por cimento, água e agregados, conforme a Figura 1), que conferem à estrutura a capacidade necessária para suportar cargas que provocam a expansão ou tensão. Por outro lado, o concreto, por si só, é especialmente eficaz em resistir aos esforços de compressão. Sua composição robusta e características intrínsecas tornam-no ideal para suportar cargas que tendem a comprimir ou reduzir o volume da estrutura. Essa combinação estratégica de concreto e armaduras possibilita a construção de edificações e infraestruturas capazes de enfrentar uma variedade de forças e demandas estruturais (Santos, 2008).

Figura 1 - Componentes do concreto simples



Fonte: Pinheiro *et al.* (2004).

Segundo Bastos (2006) devido o concreto possuir baixa resistência a tração, ao contrário do aço, e tendo em vista que ambos possuem coeficientes de dilatação parecidos nas primeiras faixas de deformação, é possível a junção dos dois materiais. Objetivando aumentar a capacidade do concreto aos esforços de tração, para que quando solicitado, o concreto armado tenha a capacidade de resistir às forças de tração e compressão, com o concreto absorvendo as forças de compressão e as barras de aço as forças de tração.

3.1.2 Características mecânicas do concreto armado

O concreto armado é caracterizado por diversas propriedades mecânicas essenciais. Sua resistência à compressão, medida pela resistência à compressão do concreto, destaca-se como a capacidade de suportar cargas que comprimem o material. Reforçado por armaduras de aço, o concreto armado possui sua resistência à tração significativamente aprimorada. O módulo de elasticidade, que mede a rigidez do material sob cargas de compressão ou tração, indica sua deformação elástica.

A aderência eficiente entre o concreto e as armaduras é crucial para a transferência eficaz de esforços. A ductilidade é a capacidade do material de deformar-se plasticamente antes da falha, proporcionando alertas prévios e permitindo ajustes. O peso específico influencia a carga total suportada pela estrutura e afeta o projeto de fundações. Considerações importantes incluem retração e expansão térmica para evitar fissuras devido a mudanças térmicas.

A durabilidade é vital, resistindo à deterioração causada por exposição a agentes químicos ou ciclos de congelamento e descongelamento. A impermeabilidade mantém a integridade do concreto e das armaduras, resistindo à penetração de água e agentes agressivos. Finalmente, a tenacidade, ou habilidade de absorver energia sem fraturar, proporciona uma resposta mais segura a cargas dinâmicas. Todas essas propriedades são fundamentais para o desempenho e a segurança de estruturas de concreto armado em diversas aplicações na engenharia civil.

Segundo Lima, Coutinho e Azevedo (2019), o concreto é uma mistura característica facilmente maleável e fácil de ser moldado. Ao fim da fase de endurecimento, possui grande resistência à compressão, podendo ser capaz de sustentar grandes estruturas e fazendo com que o seu uso seja cada vez maior.

Os materiais que são utilizados no concreto armado, são comercializáveis facilmente em qualquer parte do mundo, tornando o concreto universalmente econômico. Além de ser um material estável quando executado corretamente o crescimento da resistência é gradativo quando exposto a intempéries normais excluindo efeitos de congelamento e incidência de ambientes agressivos (Adolfato, 2002).

3.2 Manifestações patológicas

Em estruturas de concreto, muitas vezes, podem-se observar manifestações alheias a sua constituição original que causam danos a sua integridade e funcionalidade. Elas são estudadas pela patologia, um ramo próprio da Engenharia Civil que se preocupa com os sintomas, desenvolvimento, causas, mecanismos e origem dessas manifestações no concreto armado, não esquecendo que uma mesma manifestação patológica pode ter diversas origens, o que torna esse trabalho mais complexo do que aparenta (Ferreira, 2018). Podem vir a tornarem-se pequenos incômodos como vazamentos, infiltrações e defeitos estéticos (Figura 2), até grandes problemas ao ponto de colapsar a estrutura (Helene, 1988).

Figura 2 – Manifestações patológicas



a) Presença de microorganismos no guarda-corpo de uma edificação. Fonte: Bolina, Tutikian e Helene (2019).



b) Fissura longitudinal em uma cortina atirantada e formação de líquens. Fonte: Bolina, Tutikian e Helene (2019).



c) Empoçamento em laje devido a chumbamento de eletrodutos sobre o piso. Fonte: Grossi (2021).

Porém, muitas vezes as manifestações patológicas aparecem devido a falta de conhecimento técnico e/ou executivo por parte da equipe responsável pela execução da estrutura; descaso ou negligência com os processos construtivos, gerando alta probabilidade de prejuízos, muitas vezes, não só financeiros, mas humanos (Matildes, 2022).

Segundo Cánovas (1988) *apud* Matildes (2022) a maioria das estruturas que vão a ruína, não é ocasionada por apenas uma manifestação patológica, mas por várias, que agem de maneira conjunta, reduzindo a resistência mecânica da estrutura, trazendo graves consequências, como o colapso das mesmas.

Geralmente em casos de acidentes catastróficos, como por exemplo, prédios que vão a ruína, não correspondem a apenas uma origem agindo sozinha, mas sim a várias que, juntamente acabam levando a estrutura ao colapso. Não é difícil encontrar estruturas nas quais foi cometido um grande erro em qualquer uma das etapas e mesmo assim não apresentam grandes danos. Do contrário, pode-se encontrar estruturas que apresentem grandes danos que reduzem a durabilidade e resistência mecânica, mas que sua causa vem de erros ou falhas menores, mas

quando atuam de maneira conjunta, superpõem seus efeitos e trazem graves consequências (Cánovas, 1988).

3.2.1 Durabilidade do concreto

Vale ressaltar que, uma longa vida útil é considerada sinônimo de durabilidade (De Castro; Rubio, 2018). Contudo, a durabilidade de um material em um conjunto específico de condições não pode ser automaticamente extrapolada para outras. A capacidade de resistir à ação do intemperismo, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração é o que se define como durabilidade do concreto; isto é, o concreto durável manterá sua forma original, qualidade e facilidade de manutenção quando exposto ao seu ambiente. Nenhum material, porém, é inerentemente durável; como resultado das interações ambientais, a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades dos materiais mudam com o tempo.

A deterioração do concreto pode ser causada por (a) uso de materiais inadequados; (b) práticas de construção deficientes; e (c) causas relacionadas ao meio ambiente de problemas de durabilidade do concreto.

As características de durabilidade inferiores do concreto podem ser causadas pelo ambiente ao qual o concreto é exposto (Garcia *et al.*, 2021). As seguintes condições ambientais podem afetar a durabilidade do concreto: temperatura, umidade, fatores físicos, fatores químicos e fatores biológicos. Esses fatores podem ser decorrentes de condições climáticas (alterações de temperatura e umidade), abrasão, ataque de líquidos e gases naturais ou industriais, ou agentes biológicos (Rocha, 2021). Os problemas de durabilidade relacionados a causas ambientais incluem: corrosão do aço, delaminação, fissuras, carbonatação, ataque de sulfato, ataque químico, incrustação, fragmentação, abrasão e cavitação.

Sob condições de restrição no concreto, a interação entre as tensões elásticas de tração induzidas pelas deformações de retração e o alívio das tensões devido ao comportamento viscoelástico está no centro das deformações e fissuras na maioria das estruturas. Para entender a razão pela qual um elemento de concreto pode não rachar ou rachar, mas não logo após a exposição ao meio ambiente, tem-se que considerar como o concreto responderia à tensão sustentada ou à

deformação sustentada. O fenômeno de um aumento gradual da deformação com o tempo sob um determinado nível de estresse sustentado é chamado de fluência (Garcia *et al.*, 2021).

O fenômeno de diminuição gradual da tensão com o tempo sob um determinado nível de tensão sustentada é chamado de relaxamento da tensão. Ambas as manifestações são típicas de materiais viscoelásticos. Quando um elemento de concreto é restringido, a viscoelasticidade do concreto se manifestará em uma diminuição progressiva da tensão com o tempo (Garcia *et al.*, 2021). Assim, nas condições de restrição presentes no concreto, a interação entre as tensões elásticas de tração induzidas pelas deformações de retração e o alívio de tensões devido ao comportamento viscoelástico está no centro das deformações e fissuras na maioria das estruturas.

Em geral, os sólidos expandem no aquecimento e contraem no resfriamento. A deformação associada à mudança de temperatura dependerá do coeficiente de expansão térmica do material e da magnitude da queda ou aumento da temperatura. Exceto sob condições climáticas extremas, as estruturas comuns de concreto sofrem pouco ou nenhum desgaste com as mudanças na temperatura ambiente (Garcia *et al.*, 2021). No entanto, em estruturas maciças, a combinação do calor produzido pela hidratação do cimento e condições relativamente ruins de dissipação de calor resulta em um grande aumento da temperatura do concreto dentro de alguns dias após a concretagem. Subsequentemente, o resfriamento até a temperatura ambiente geralmente faz com que o concreto rache.

Uma vez que a principal preocupação no projeto e construção de estruturas de concreto maciço é que a estrutura concluída permaneça um monólito, livre de fissuras, todo esforço para controlar o aumento de temperatura é feito através da seleção de materiais adequados, proporções de mistura, condições de cura e práticas de construção (Rocha, 2021). Com materiais de baixa resistência à tração, como o concreto, é a tensão de retração do resfriamento que é mais importante do que a expansão do calor gerado pela hidratação do cimento. Isso ocorre porque, dependendo do módulo de elasticidade, do grau de restrição e do relaxamento de tensão devido à fluência, as tensões de tração resultantes podem ser grandes o suficiente para causar trincas (Garcia *et al.*, 2021).

Além disso, um elemento de concreto, se livre para se mover, não teria

desenvolvimento de tensão associado à deformação térmica no resfriamento. No entanto, na prática, a massa de concreto será restringida externamente pela fundação rochosa ou internamente por deformações diferenciais em diferentes áreas de concreto devido à presença de gradientes de temperatura (De Castro; Rubio, 2018). Ademais, a hidratação dos compostos cimentícios envolve reações exotérmicas que geram calor e aumentam a temperatura da massa de concreto. O aquecimento causa expansão, e a expansão sob restrição resulta em tensão de compressão. No entanto, em idades precoces, o módulo de elasticidade do concreto é baixo e o relaxamento de tensões é alto, portanto, a tensão de compressão será muito pequena, mesmo em áreas de restrição total. No projeto, para ser conservador, assume-se que não existe uma condição de compressão inicial (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

O coeficiente de expansão térmica é definido como a mudança no comprimento da unidade por grau de mudança de temperatura. A seleção de um agregado com baixo coeficiente de dilatação térmica, quando economicamente viável e tecnologicamente aceitável, pode, em determinadas condições, tornar-se um fator crítico para a prevenção de fissuras no concreto massa (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021). Isso ocorre porque a deformação de retração térmica é determinada tanto pela magnitude da queda de temperatura quanto pelo coeficiente linear de expansão térmica do concreto; este último, por sua vez, é controlado principalmente pelo coeficiente linear de dilatação térmica do agregado que é o constituinte primário do concreto.

O calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de um material em um grau. O calor específico do concreto de peso normal não é muito afetado pelo tipo de agregado, temperatura e outros parâmetros. A condutividade térmica fornece o fluxo transmitido através de uma unidade de área de um material sob um gradiente de temperatura unitário. A condutividade térmica do concreto é influenciada pelas características mineralógicas do agregado e pelo teor de umidade, densidade e temperatura do concreto (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021). Além disso, como dito anteriormente, o principal significado das deformações causadas pela tensão aplicada e pelos efeitos térmicos e relacionados à umidade no concreto é se sua interação levaria ou não à fissuração. Assim, a magnitude da deformação de retração é apenas um dos fatores

que governam a fissuração do concreto.

Por fim, quanto menor o módulo de elasticidade, menor será a quantidade de tensão de tração elástica induzida para uma determinada magnitude de retração; quanto maior a fluência, maior é a quantidade de relaxamento de tensão e menor a tensão de tração líquida; quanto maior a resistência à tração, menor é o risco de que a tensão de tração exceda a resistência e rache o material. A combinação de fatores que são desejáveis para reduzir o advento da fissuração no concreto pode ser descrita por um único termo denominado extensibilidade (De Castro e Rubio, 2018). Diz-se que o concreto tem um alto grau de extensibilidade quando pode ser submetido a grandes deformações sem fissuras (Rocha, 2021). Para um risco mínimo de fissuração, o concreto deve sofrer não apenas menos retração, mas também deve ter um alto grau de extensibilidade (ou seja, baixo módulo de elasticidade, alta fluência e alta resistência à tração). Em geral, os concretos de alta resistência são mais propensos à fissuração devido à maior retração e menor fluência; por outro lado, concretos de baixa resistência tendem a fissurar menos, provavelmente devido à menor retração e maior fluência.

3.2.2 Deterioração do concreto armado

O concreto é um material poroso, e os vazios presentes em sua estrutura são devido principalmente ao excesso de água, diminuição de volumes, ar incorporado durante a mistura e erro na dosagem de insumos (Bauer, 1995).

Segundo Nepomuceno (2005), a deterioração do concreto se dá pela penetração de substâncias na forma de gases, vapores e líquidos através de poros e fissuras. Dentre os fatores que contribuem para a deterioração do concreto armado estão: erros de projetos e execução, inadequação dos materiais, má utilização na obra, agressividade do meio ambiente, falta de manutenção, ineficiência e ou ausência de controle da qualidade na construção (Brandão, 1998).

3.2.3 Principais manifestações patológicas que ocorrem no concreto

Algumas manifestações patológicas que ocorrem no concreto estão intimamente ligadas à sua capacidade de resistir às intempéries, ou seja, resistir aos

processos de deterioração, ataques químicos, físicos e mecânicos, que podem afetar sua capacidade original quando exposto ao meio ambiente (Andrade, 1997). Outras, estão relacionadas a fatores como, constatado por Souza e Ripper (1998), falhas advindas de estudos preliminares deficientes, ou ainda anteprojetos equivocados, ou do projeto executivo que são os principais responsáveis pelo aparecimento de manifestações patológicas sérias. A seguir estão alguns problemas patológicos causados por esses fatores, além de mais alguns relacionados a fase construtiva (Arivabene, 2015; Souza e Ripper, 1998):

- Elementos de projetos inadequados (deficiência no cálculo da estrutura, avaliação da resistência do solo, má definição do modelo analítico, etc.);
- Falta de compatibilidade entre o projeto estrutural e o arquitetônico, bem como os demais projetos civis;
- Especificação inadequada de materiais;
- Detalhamento insuficiente ou errado;
- Detalhes construtivos inexequíveis;
- Falta de padronização das representações (convenções);
- Erros de dimensionamento;
- Deficiências de concretagem (transporte, lançamento, juntas de concretagem, adensamento, cura, outros);
- Inadequação de escoramentos e fôrmas;
- Deficiência nas armaduras (estribos, ancoragem, emendas, cobrimento, espaçamento, posicionamento);
- Má utilização ou utilização incorreta dos materiais de construção (fck inferior ao especificado, aço diferente do especificado, solo com características diferentes, utilização inadequada de aditivos, dosagem inadequada do concreto);
- Inexistência de controle de qualidade.

Segundo a NBR 6118 (2014) item 6.3.2 os mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto, apresentados na Figura 3, são:

- Lixiviação: mecanismo responsável por dissolver e carrear os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras. Para prevenir sua ocorrência, recomenda-se restringir a fissuração, de forma a minimizar a infiltração de água, e proteger as

superfícies expostas com produtos específicos, como os hidrófugos.

- Expansão por sulfato: expansão por ação de águas ou solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado. A prevenção pode ser feita pelo uso de cimento resistente a sulfatos.
- Reação álcali-agregado (RAA): expansão por ação das reações entre os álcalis do concreto e agregados reativos. O projetista deve identificar no projeto o tipo de elemento estrutural e sua situação quanto à presença de água, bem como recomendar as medidas preventivas, quando necessárias.

Figura 3 – Mecanismos de deterioração preponderantes



a) Lixiviação do concreto. Fonte: Bolina, Tutikian e Helene (2019).



b) Expansão por sulfato. Fonte: Bolina, Tutikian e Helene (2019).



c) Reação álcali-agregado (RAA). Fonte: Bolina, Tutikian e Helene (2019).

Uma das principais causas de danos físicos e mecânicos no concreto é a variação de temperatura, que pode resultar em fissuras devido à alteração do volume. A deformação por retração que está associado a deformação no concreto independente dos carregamentos, ocasionada pela perda de água do cimento, podendo ocorrer no seu estado plástico e endurecido. A deformação por fluência que são carregamentos constantes no concreto que ocorrem sobre tração, cisalhamento e compressão. E os desgastes por erosão, abrasão e cavitação que ocorrem por causa do esfregamento, fricção e escorregamento devido ao desgaste na superfície do concreto (Lapa, 2008).

Das patologias químicas, pode-se citar os ácidos com altas concentrações, e as chuvas ácidas (Figura 4a), pois estes agentes agressivos penetram no concreto de diferentes formas, ocasionando a diminuição da resistência, o destacamento e o aumento da porosidade (Lapa, 2008).

Outra patologia que ocorre no concreto é a biodeterioração do concreto, que é quando ocorrem mudanças indesejáveis nas propriedades dos materiais, podendo acarretar na redução da durabilidade, comprometendo a integridade e influenciando na sua estética (Lapa, 2008).

E por fim, alguns sintomas de deterioração que ocorrem no concreto e que são objetivos de estudo neste trabalho, que são a carbonatação (Figura 4b), corrosão das armaduras (Figura 4c), deslocamento, ataque químico, expansão por reação Álcali-agregado (RAA) e desgaste superficial que serão discorridas nos itens que se seguem.

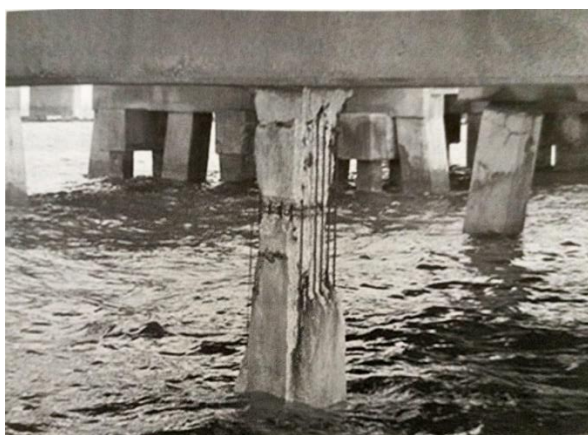
Figura 4 – Manifestações patológicas.



a) Cobertura danificada por chuva ácida. Fonte: Bolina, Tutikian e Helene (2019).



b) Carbonatação do concreto. Fonte: Bolina, Tutikian e Helene (2019).



c) Corrosão na armadura de pilar. Fonte: Bolina, Tutikian e Helene (2019).

3.2.4 Principais patologias que ocorrem no aço

Dentre as principais manifestações patológicas que ocorrem no aço, a principal, é a corrosão (Figura 4c). A corrosão é a degradação do aço metálico, que ocorre por meio eletroquímico e químico do meio ambiente, somado aos esforços mecânicos. Esta degradação apresenta alterações indesejáveis, causadas entre a relação física e químicas dos materiais e o seu meio operacional, sofrendo com o desgaste, modificações estruturais ou variações químicas, tornando-os impróprios para o uso (Gentil, 1996).

Partindo do conceito de que a corrosão é o desgaste natural vindo do contato com o meio ambiente, ela pode se manifestar de diversas formas, sendo as mais conhecidas a corrosão uniforme e localizada.

A corrosão uniforme é a corrosão distribuída por grandes extensões do material metálico, e é uma das patologias mais comuns de se ocorrer em estruturas metálicas. Por se distribuir por essa grande extensão pode ser estimada a velocidade

com que ela progride (Pannoni, 2011).

A corrosão localizada, é causada pela falha de processos construtivos e drenagens das águas, que acarreta o agrupamento de umidade juntamente com os agentes agressivos. Outro tipo de patologia que se pode encontrar no aço são as deformações excessivas causados por cargas além da realidade de projeto. (Pravia e Betinelli, 2016).

Segundo Pravia e Betinelli (2016), a flambagem local, é outro tipo de patologia causada pelo uso de modelos estruturais incorretos, para verificação da deficiência de enrijecimento e instabilidade local das chapas. E a propagação de fraturas que são falhas que ocorrem por acúmulo de tensões e variações não previstas de projetos.

No Brasil, todos os tipos de construção sofrem com as patologias que ocorrem no aço. Pode-se citar que para ocorrer uma patologia, deve-se levar em consideração as patologias de projeto, que ocorrem interferindo no resultado final do tipo construção. Devido a estes erros é muito importante se atentar às normas técnicas e solicitações dos clientes para evitar ao máximo este tipo de solicitação (Pannoni, 2011).

Sabe-se que diversos tipos de patologias existentes, como a corrosão das armaduras, são capazes de influenciar a composição do aço. Quando o concreto é exposto a condições adversas, como ambientes salinos ou ácidos, a corrosão pode ocorrer nas armaduras de aço. Isso resulta na formação de óxidos de ferro, conhecidos como ferrugem, que têm um volume maior do que o aço original. A expansão causada pela corrosão exerce pressão sobre o concreto ao redor, levando a fissuras, deslocamento e, em última instância, afetando a composição e a integridade do aço nas armaduras. Além das citadas, há alguns outros tipos que poderiam afetar este tipo de material, ocasionando perdas que podem ser imensuráveis, com um alto valor econômico (Pannoni, 2011).

3.3 Inspeção de estruturas de concreto

Segundo Helene (2003), apesar do concreto de cimento Portland ser o material mais adequado para construção em concreto armado frente a outros, nos últimos anos vem se notando aumento expressivo nas manifestações patológicas das

construções brasileiras em concreto armado, inferindo-se, portanto, que não há elemento estrutural com vida útil infinita, devido, na maioria dos casos, a exposição dessas estruturas ao ambiente.

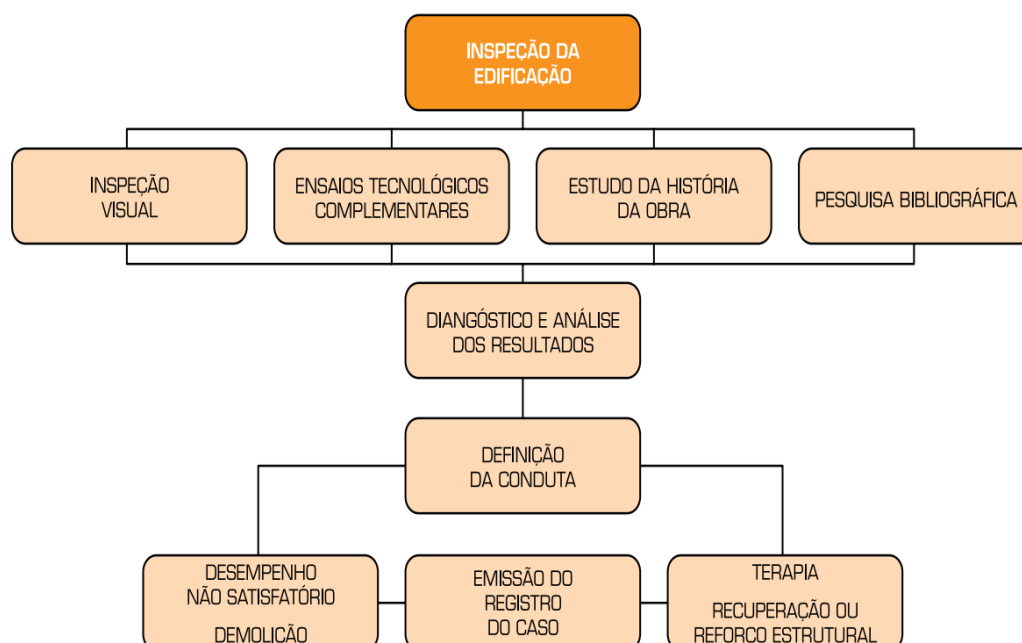
Frente as essas manifestações patológicas observam-se, em geral, um descaso inconsequente que leva a simples reparos superficiais ou, inversamente, a demolições ou reforços injustificados. Os dois extremos são desaconselháveis uma vez que há, hoje em dia, uma elevada gama de técnicas e produtos desenvolvidos especificamente para solucionar esses problemas (Helene, 2003).

Assim, para uma melhor análise das condições de uma estrutura tem-se de forma geral a inspeção predial, que se baseia, na avaliação das condições técnicas, de uso, operação, manutenção e funcionalidade da edificação e de seus sistemas e subsistemas construtivos, conforme o fluxograma na Figura 1. Busca-se constatar a situação da edificação quanto à sua capacidade de atender os requisitos dos usuários, com registro das anomalias, falhas de manutenção, uso e operação e manifestações patológicas identificadas nos diversos componentes de uma edificação (ABNT 16747, 2020).

Para a realização de inspeção do desempenho predial, o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) disponibiliza um organograma para a elaboração de laudos técnicos (Figura 5), e, conforme a ABNT 16774 (2020), de forma geral, deve-se ter no mínimo a presença dos requisitos:

- a) segurança: estrutural; incêndio; no uso e na operação.
- b) habitabilidade: estanqueidade; saúde, higiene e qualidade do ar; funcionalidade e acessibilidade.
- c) sustentabilidade: durabilidade e manutenibilidade.

Figura 5 – Organograma de um laudo técnico para avaliação de patologias. Fonte: IBRACON (p. 15, 2008).



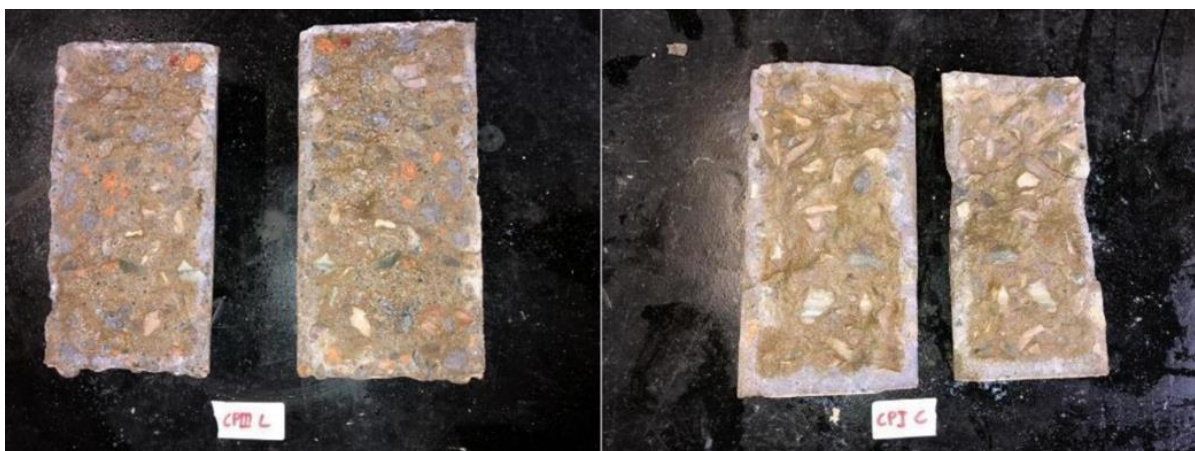
Sob ótica holística do processo de degradação das estruturas de concreto armado existe uma interação entre os fatores responsáveis por danificar as estruturas (como, por exemplo, ação do homem, agressividade do ambiente, erros de execução da estrutura, etc.). Esses efeitos combinados do meio ambiente e características intrínsecas ao concreto dificultam a determinação dessa colaboração (Andrade, 1997).

O concreto está sempre em processo de mudança, pode-se perceber na permeabilidade e na porosidade que mudam ao longo dos anos com a penetração de substâncias, água, CO₂, cloretos e sulfatos a partir da sua superfície para o seu interior (Basheer et al, 1994).

A Figura 5 foi retirada de uma pesquisa de Oliveira *et al.* (2020), em que os autores mostram o ataque de cloretos em concreto leve estrutural (com argila expandida) e em concreto convencional em corpos de prova. Onde foram realizados ensaios de penetração de cloreto em corpos de prova moldados em diferentes traços e em solução aquosa com presença de cloretos (Cl⁻) por 28 dias, a fim de simular um ambiente de alta agressividade. A partir dos resultados obtidos os autores verificaram que os Corpos de Prova (CP) com argila expandida obtiveram valores de penetração de cloretos menores, quando comparada com os CPs de concreto convencionais.

Figura 5 - Corpos de prova em concreto leve e convencional após aspergidos com nitrato de prata.

Fonte: Oliveira *et al.* (2020).



Segundo os autores Oliveira *et al.* (2020) o concreto leve apresentou uma durabilidade maior se comparado ao convencional, devido a sua absorção de água ser inferior, o que indica que as fissurações presentes no concreto leve são menores.

Processos físico-químicos, como a própria hidratação do cimento, também influenciam no contínuo processo de mudança. É extremamente difícil modelar um sistema que muda continuamente, onde há uma carência de informações a respeito de uma grande parte dos seus elementos constituintes e onde muitos deles apresentam variações grandes no decorrer do tempo (Andrade, 1997).

4 MONITORAMENTO ESTRUTURAL

A vida em sociedade depende da infraestrutura civil, como pontes, edifícios, túneis, usinas de energia e barragens. A manutenção e monitoramento da infraestrutura civil para uma estimativa precisa da idade da infraestrutura, usabilidade e também as prováveis causas de preocupação são de grande importância. Além disso, o mau funcionamento e imprudência, negligência e ações humanas inconscientes sobre a infraestrutura civil causam enormes perdas econômicas e custam inúmeras vidas humanas. O desenvolvimento de métodos eficazes de monitoramento da saúde estrutural ganhou força entre a comunidade de pesquisa nos últimos anos (Garcia *et al.*, 2021).

Para buscar sempre a primazia da segurança é fundamental ter o máximo de informações sobre a situação da estrutura estudada. E isso pode ser obtido por meio da inspeção, análise, observação e obtenção de dados com a implementação de metodologias e programas que avaliam o real estado estrutural de uma edificação (Marques, 2007).

O monitoramento estrutural se define pela utilização de método de ensaios não destrutivos, isto é, que não causam danos a estrutura ensaiada ou mesmo que causem danos, eles são insignificantes na influência da capacidade de suporte da edificação. Por um lado, o monitoramento em estruturas já existentes, busca principalmente analisar a integridade e a presença de manifestações patológicas que possam vir comprometer a estrutura. Por outro lado, para estruturas recém-fabricadas pode servir como acompanhamento ao desenvolvimento da resistência e da qualidade do concreto (Adamati *et al.*, 2017).

Apesar das inspeções técnicas se configurarem como sendo uma boa ferramenta na avaliação do estado de uma estrutura, o seu carácter periódico introduz algumas limitações tais como a ausência de controle na evolução de uma determinada anomalia e no aparecimento de novas situações, e o desconhecimento do real desempenho da estrutura inspecionada (Marques, 2007, p. 09).

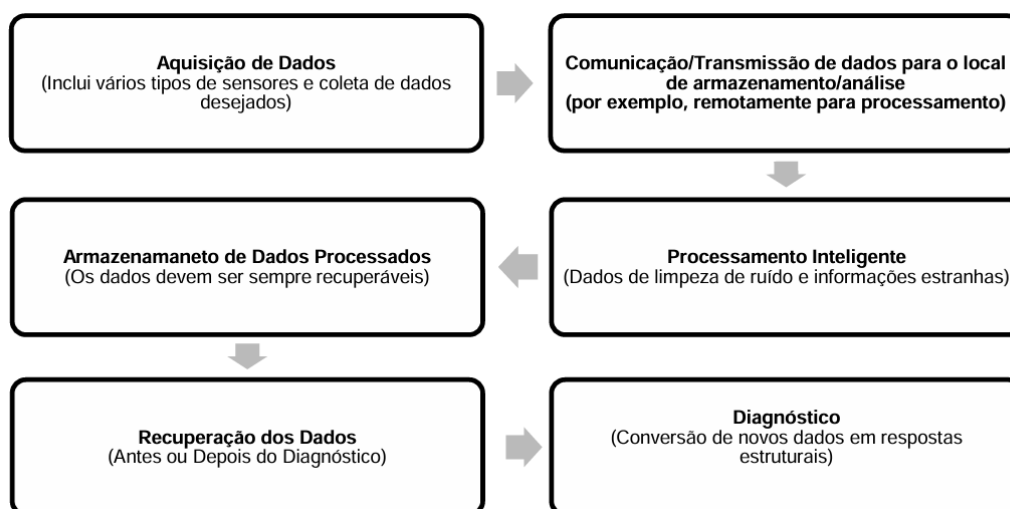
A identificação da existência de danos ocorre durante a análise, à medida que se avalia a possível redução no desempenho estrutural, sendo uma das finalidades do monitoramento. A detecção dos locais de deterioração ou danos de forma antecipada garante rápida atuação e proporciona uma economia nos custos e

materiais quando se torna necessária a recuperação (Fraga, 2015; Isis, 2006).

Danos a estruturas são causados ou por fatores externos ou por internos e que afetam sobretudo a perda a capacidade de suporte do concreto. A determinação do local, o tipo e o nível de avanço dos danos são foco do monitoramento em conjunto com avaliação dos efeitos sobre a estrutura, buscando-se soluções capazes de eliminar ou reduzir o risco a segurança (ISIS *et al*, 2006). Na Figura 6 apresenta um esquema de como se dá a obtenção de dados para intervenção em estruturas.

Conforme Fraga (2015) as estruturas já existentes são as que melhor se beneficiam das potencialidades do monitoramento. Porque nem sempre é conhecido o comportamento estrutural de edifícios existentes e porque muitos dos edifícios ultrapassaram o seu período de vida útil, a monitorização surge como ferramenta para a solução deste problema.

Figura 6 - Componentes de um sistema de saúde de estruturas (Fonte: Isis *et al.* (2006)).



Com isso, a relação do custo da intervenção adotada pode se beneficiar com valores mais fidedignos quando se faz uso de monitoramento, visto que as intervenções só serão aplicadas quando, no que for e na medida do necessário. Então é possível ter um planejamento mais confiável e preciso, tornando mais eficazes as soluções fundamentadas em sistemas de monitoramento (Marques, 2007; Lorenzoni, 2014).

De forma geral, o monitoramento (ou também conhecido por ausculta) de estruturas envolve o registro de parâmetros dependentes do tempo. Os parâmetros monitorados podem ser físicos, mecânicos, químicos, etc. e geralmente estão

presentes em cada ponto da estrutura. A totalidade dos meios utilizados para o monitoramento é chamada de sistema de monitoramento. Os principais componentes de um sistema de monitoramento são sensores, portadores de informação, unidade de leitura, interfaces e subsistemas gerenciadores de dados. (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

O monitoramento da saúde de uma estrutura civil é essencial para rastrear o envelhecimento, observar qualquer alteração estrutural e prevenir colapsos, principalmente para estruturas sujeitas a estresse, como pontes (Garcia *et al.*, 2021).

As estruturas que podem ser monitoradas são (Rocha, 2021):

- a) prédios altos e blocos de apartamentos (inclinação, formação de fissuras, degradação de pilhas e aumento de carga e tensão);
- b) pontes e arcos (alterações de frequência, carregamento de alterações, formação de fissuras e aumento de tamanho, inclinação e afundamento de pilares e alterações de tensão e carga);
- c) edifícios e estruturas patrimoniais (formação de fissuras, monitoramento de trincas existentes, degradação de montantes de suporte de carga, afundamento e inclinação de estruturas e aumento de carga e tensão);
- d) barragens e hidrovias (alterações de tensão e carga, formação de fissuras, monitoramento de fissuras, degradação de paredes e pilares, afundamento de colunas e mudanças de fluxo);
- e) linhas ferroviárias e pontes (mudanças de frequência e carga, inclinação e flambagem de montantes, formação e monitoramento de trincas, afundamento de pilhas e empenamento de linhas por meio de mudanças de temperatura);
- f) rodovias (alterações de tensão, mudanças de frequência e vibração, formação e monitoramento de trincas, afundamento de pilhas, mudanças de tensão em vigas de suporte de carga e empenamento de estradas através de mudanças de temperatura).

Como o nome sugere, sensores para monitoramento de integridade estrutural são usados para detectar a condição de uma estrutura e seu ambiente. Essas informações são então usadas para tomar decisões sobre a melhor forma de proteger a estrutura e mantê-la em condições seguras (De Castro e Rubio, 2018).

Existem muitos tipos diferentes de sensores que podem ser utilizados

dependendo da necessidade da estrutura particular que está sendo monitorada. Alguns exemplos comuns incluem sensores de vibração, de temperatura, de estresse, de delaminação, de deformação, de umidade e de pressão (Garcia *et al.*, 2021). Ao coletar dados desses sensores ao longo do tempo, os engenheiros podem obter uma imagem detalhada da integridade da estrutura e tomar decisões mais precisas sobre como mantê-la.

O monitoramento de condições permite que diferentes parâmetros do sistema sejam projetados, supervisionados, controlados e avaliados durante a operação do sistema em diferentes processos, como aqueles usados em máquinas, estruturas e diferentes variáveis físicas em aplicações mecânicas, químicas, elétricas, aeronáuticas, civis, eletrônicas, mecatrônicas e de engenharia agrícola, entre outras (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

O monitoramento contínuo dessas estruturas é uma necessidade, pois estas estão sujeitas a alterações nas condições ambientais e de operação ao longo de sua vida útil, o que pode resultar em mudanças e possíveis falhas e danos em toda a estrutura e em seus componentes. O bom desenvolvimento dessas aplicações está associado ao uso de dados confiáveis de sensores isolados ou de uma rede de sensores (Garcia *et al.*, 2021).

O processo de identificação de danos é abordado no monitoramento de integridade estrutural, monitoramento das estruturas de concreto para determinar diferentes níveis do estado de uma estrutura. Esses níveis incluem detecção e localização de danos, o conhecimento do tipo e extensão do dano, a previsão do tempo de vida restante e o desenvolvimento de estruturas inteligentes. Cada uma dessas etapas pode ser abordada de diferentes pontos de vista, mas uma das mais utilizadas são as estratégias orientadas por dados (Garcia *et al.*, 2021). Além disso, o uso de algoritmos orientados a dados é explorado em cada nível do diagnóstico de danos, bem como o processo de instrumentação e implementação para mostrar o estado atual de alguns dos desenvolvimentos do monitoramento das estruturas de concreto orientado a dados.

Os sensores de monitoramento de integridade estrutural são uma tecnologia relativamente nova que usa várias formas de comunicação, algumas sem fio, para enviar dados sobre a condição de uma estrutura para um computador ou centro de controle. Os dados podem ser usados para monitorar patologia estrutural, e

podem ajudar engenheiros ou operadores a detectar problemas antes que se tornem muito sérios. Os sensores funcionam anexando pequenos dispositivos à superfície da estrutura que está sendo monitorada. Esses dispositivos se comunicam entre si usando sinais elétricos, ópticos, vibração, ondas acústicas, etc. e enviam dados de volta para um receptor central (De Castro e Rubio, 2018). Esses dados podem ser usados para criar mapas da condição da estrutura, rastrear mudanças ao longo do tempo ou até mesmo prever problemas antes que eles ocorram.

Existem alguns tipos diferentes de sensores de monitoramento de integridade estrutural, mas os mais comuns são sensores de vibração, acelerômetros e medidores de tensão. Os sensores de vibração detectam o movimento e a vibração de uma estrutura, enquanto os acelerômetros medem a aceleração linear (Garcia *et al.*, 2021). Já os dispositivos medidores de deformação são usados para medir a deformação de um material em resposta a uma força aplicada. Ao combinar dados desses diferentes tipos de sensores, os engenheiros podem obter uma visão mais completa do desempenho de uma estrutura.

Conforme De Castro e Rubio (2018), há muitos benefícios de usar sensores de monitoramento de integridade estrutural, incluindo:

- a) maior segurança – ao identificar problemas potenciais com uma estrutura desde o início, é possível evitar que os danos se agravem e representem um risco à segurança;
- b) custos de manutenção reduzidos – a detecção precoce de danos significa que os reparos podem ser realizados antes que os danos se espalhem e se tornem mais caros para consertar;
- c) maior longevidade da estrutura – com monitoramento regular, pequenos problemas podem ser identificados e corrigidos antes que se transformem em grandes problemas, resultando em uma vida útil mais longa para a estrutura como um todo.

Algumas aplicações comuns de sensores de monitoramento de integridade estrutural incluem a detecção de corrosão, fissuras e outros danos em pontes, edifícios e outras infraestruturas; avaliar a saúde de turbinas eólicas, aeronaves e outras máquinas de grande porte; e monitoramento da condição de oleodutos e outras infraestruturas de petróleo e gás.

Os sensores de monitoramento da integridade estrutural podem fornecer

alertas rápidos sobre falhas iminentes em infraestruturas críticas, o que pode ajudar a evitar acidentes ou desastres dispendiosos (Garcia *et al.*, 2021). De Castro e Rubio (2018) afirmam que eles também podem ajudar a reduzir os custos de manutenção detectando danos antecipadamente e permitindo reparos proativos. E, finalmente, eles podem desempenhar um papel importante na segurança e proteção, ajudando a garantir a integridade dos sistemas de infraestrutura crítica. Diante disso, os sensores estão se tornando cada vez mais comuns no mundo do monitoramento da integridade estrutural. De pontes a edifícios, sensores estão sendo usados para detectar pequenas mudanças em uma estrutura que podem levar a problemas maiores no futuro.

Um sistema de monitoramento de saúde típico é composto por uma rede de sensores que medem os parâmetros relevantes para o estado da estrutura e seu ambiente, como temperatura, estresse, delaminação, tensão, vibração e umidade. Para o monitoramento da integridade estrutural, é crucial contar com sensores que ofereçam respostas rápidas, sejam robustos e forneçam leituras confiáveis a longo prazo.. Embora muitos tipos de sensores tenham sido desenvolvidos e demonstrados, o potencial para sensores *in situ* inovadores de alto desempenho é cada vez mais evidente.

De Castro e Rubio (2018) afirmam que os principais tipos de sensores são:

- a) sensores cinemáticos: em linhas gerais, o termo cinemático refere-se ao estudo do movimento de partículas ou corpos sem considerar o causa que induziu o movimento. Neste sentido, um sensor cinemático, para aplicações de monitoramento das estruturas de concreto, mede o movimento induzida por uma força externa que pode ser, por exemplo, ventos moderados ou fortes, ondas sísmicas, vibrações induzidas pelo homem, entre outros. Este movimento pode ser capturado medindo o deslocamento, velocidade ou aceleração da estrutura em teste;
- b) sensores mecânicos: mede características mecânicas, como fadiga, força, tensão, corrosão, trincas, entre outros. Tornou-se uma importante tarefa em infraestrutura civil, especialmente em pontes, uma vez que estão intimamente relacionados com a sua operação segura, pois uma súbita falha pode causar consequências importantes em termos de potencial perda de vidas humanas e distorções econômicas. Além disso, a detecção

precoce da falha exigirá um orçamento mais baixo, que também é um item desejável atualmente;

- c) sensores ambientais: a influência de variáveis ambientais, como temperatura e vento, desempenha um papel importante na estimativa de as propriedades físicas em estruturas civis não podem, na maioria casos, serem desprezados. Por exemplo, sabe-se que um aumento da temperatura produzirá um aumento do comprimento dos materiais; assim, modificando a rigidez e, em consequência, alterando o valor dos parâmetros modais. Por outro lado, a medição da velocidade do vento é importante na infraestrutura civil, pois pode impor uma força excessiva que poderia, potencialmente, gerar zonas com uma maior concentração de estresse do que o planejado originalmente, entre outros efeitos. Nesse sentido, o monitoramento contínuo dessas variáveis ambientais pode estimar as propriedades mecânicas desejadas.

4.1 Processo de monitoramento

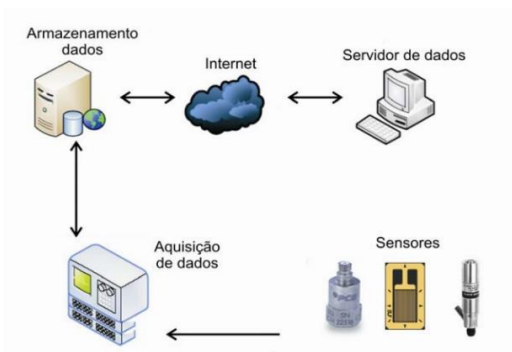
Os sistemas de monitoramento atuais são constituídos basicamente por subsistemas integrados, os quais realizam os processos de medição, aquisição, transmissão e avaliação dos dados obtidos. Primeiramente são instalados os transdutores ao longo de uma estrutura, os quais realizam as medidas de parâmetros buscados para entender a instabilidade e a deterioração da estrutura. Esses dados são captados por um subsistema de aquisição, condicionados e convertidos. Em seguida, são transmitidos para um banco de dados em um computador e/ou servidor. Por fim, ocorre o tratamento e análise dos dados obtidos, dando seguimento a obtenção de informações compreensíveis e ajudar nas decisões sobre as possíveis soluções a serem tomadas (Claudino, 2019).

Na Figura 7 é possível observar as partes básicas de um sistema de monitoramento utilizado em estruturas de concreto armado; e seus subsistemas na Figura 8, que serão discutidos ao longo desse capítulo.

Figura 7 – Sistema básico de monitoramento. Fonte: Assis, 2007.



Figura 8 - Subsistemas de um sistema de monitoramento. Fonte: Marques, 2008.

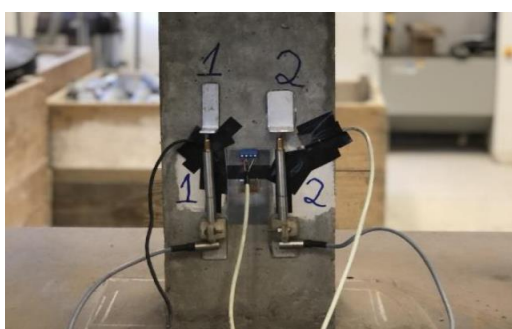


4.1.1 Transdutor

Segundo Claudino (2019), transdutores constituem parte fundamental de um sistema de monitoramento, convertendo sinais de entrada em sinais de saída, como, por exemplo, deslocamentos em energia elétrica. No mercado atual existem muitos tipos de sensores utilizados no monitoramento de estruturas com objetivo de atender aos vários parâmetros medidos, como vibrações, deslocamentos, deformações, temperatura, corrosão.

Como, por exemplo, na Figura 8 é possível ver os sensores do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer* – Transformador Diferencial Variável Linear), circulos em vermelho, sendo um dos mais difundidos e utilizados no mercado, responsável principalmente pela medição de deslocamentos lineares em estruturas.

Figura 8 – Sensor do tipo LVDT. Fonte: Pes (2022).



Trabalhando em conjunto com os transdutores estão os sensores, estes segundo Fraga (2015) realizam a aquisição de dados, enquanto a comunicação da informação se dá através do sistema de transmissão e o processamento, análise e armazenamento de dados através de um servidor. O transdutor tem o papel de converter a informação captada pelo sensor em um sinal que seja detectável e transmissível para posterior interpretação.

4.1.2 Aquisição de Dados

Os transdutores utilizados em sistemas de monitoramento fornecem sinais analógicos, muitas vezes, é necessário que os sinais obtidos sejam convertidos para uso. Deste modo, utilizam-se dispositivos de aquisição de dados (DAQ), os quais funcionam como uma interface entre os sinais fornecidos pelos transdutores e equipamentos que armazenam estes dados, atuando no condicionamento e na conversão dos sinais (Claudino; 2019).

Conforme Andrade (2012) um sistema de aquisição de dados engloba o processo de coleta de dados de vários sensores, sua conversão e transferência ao responsável. A compreensão deste sistema garante um eficiente programa de monitoramento de estruturas. Há dois tipos de forma de aquisição de dados, a manual e a computadorizada. Quanto ao sistema de aquisição de dados manual consiste na leitura visual da saída de dados feita pelo responsável pelo monitoramento, seguida de um armazenamento manual.

Um sistema de aquisição de dados básico é constituído por três componentes principais: condicionador de sinais, conversor analógico-digital (conversor A/D) e programa de aquisição de dados (*software*). Os condicionadores de sinais são circuitos eletrônicos que adequam os sinais analógicos para a conversão digital. Os conversores A/D desempenham a função de traduzir os sinais elétricos em uma representação numérica adequada ao tratamento digital do sinal adquirido. Os programas de aquisição de dados têm por finalidade controlar o sistema de aquisição, fornecendo uma interface por meio da qual o utilizador tenha total controle sobre o processo de aquisição (Assis, 2007, p. 15).

Utilizado na maioria dos casos, o sistema computadorizado, Figura 8, consiste de dispositivos de aquisição de dados (DAQ) composto de conversor analógico-digital e condicionador de sinal (tratamento), e um computador munido de

driver para comunicação com o dispositivo e um programa para a interpretação dos dados (Guimarães, 2022; Andreade, 2012). Devido a equipamentos menos robustos, esse é o mais econômico quando se pretende utilizar poucos sensores num curto período de tempo.

4.1.3 Transmissão dos Dados

Depois da etapa de aquisição de dados, as informações digitalizadas precisam estar disponíveis ao utilizador para que possam ser tratadas e analisadas com auxílio de um computador. A partir daí se insere o subsistema de comunicação entre a aquisição e a análise e interpretação dos dados recolhidos, responsável pelo subsistema de transferência da informação que leva os dados adquiridos até o computador. Um bom sistema de comunicação deve viabilizar o transporte dos dados com integridade, de modo que estes cheguem ao destino sem perdas qualitativas ou quantitativas (Assis, 2007).

Boa parte dos sistemas de monitoramento ainda hoje utilizam a transmissão por meios físicos através de cabos. Embora funcione bem, essa solução pode se tornar onerosa a depender da extensão ou complexidade da estrutura analisada. Com os avanços das tecnologias de comunicação sem fio, e no contexto atual da Internet das Coisas (*IoT – Internet of Things*), a tendência é que se utilize cada vez mais tecnologias para transmissão de dados à distância. Atualmente, existe uma variedade de tecnologias de comunicação sem fio, que variam de curta distância, tal como o *Wireless local area network* (WLAN), e de longa distância, como o GSM/GPRS (Claudino, 2019; Assis, 2007).

GSM (*Global System for Mobile Communications*) ou Sistema Global para Comunicações Móveis, é o padrão mais popular para a comunicação celular no mundo, desde 1991. Por sua vez, GPRS (*General Packet Radio Services*) ou Serviços Gerais de Pacotes por Rádio, criado em 2000, é uma tecnologia que permitiu aumentar as taxas de transferência de dados nas redes GSM existentes. Atualmente, as tecnologias GSM/GPRS são muito utilizadas em projetos de IoT, principalmente onde existe a necessidade de se monitorar variáveis à grandes distâncias, como, por exemplo, no setor agropecuário (Claudino, 2019, p. 20).

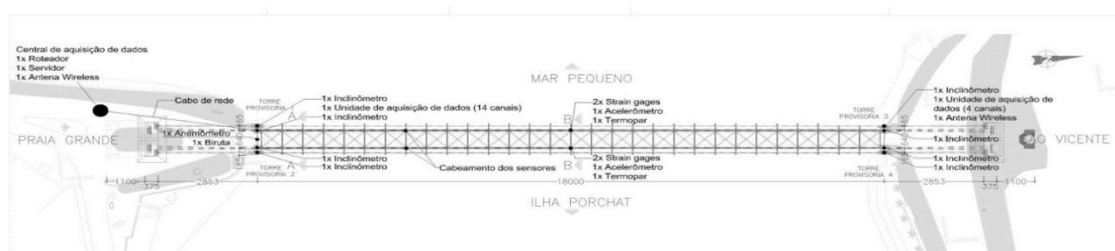
Redes sem fio, em geral, estão associadas a redução de custos no monitoramento, contudo deve-se ter atenção a problemas com relação ao consumo de

energia e a sincronização entre os sensores (Federici *et al.*, 2014).

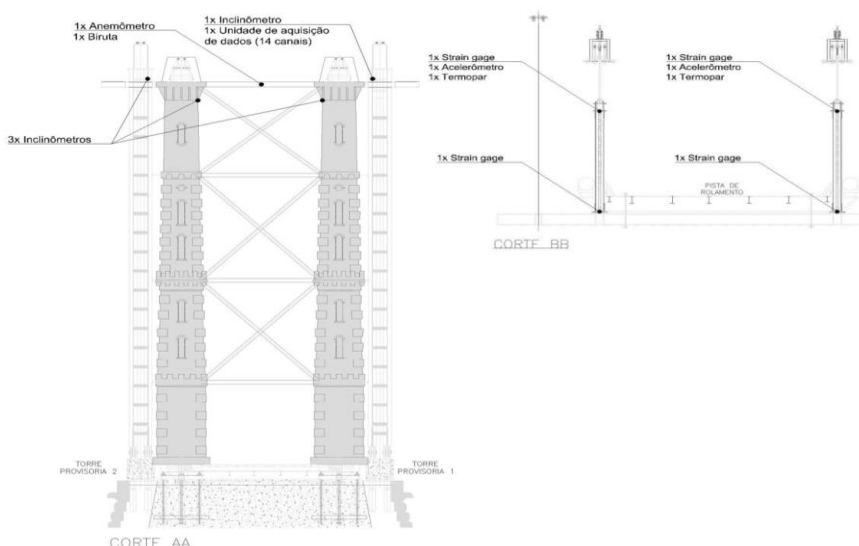
Para uma rede de sensores sem fio é utilizada a *Internet*, limitando-se muitas vezes em apenas transmitir informações dentro de uma *WLAN* ou rede de área local sem fio. Contudo, o monitoramento remoto, inclusive em tempo real, necessita que as informações monitoradas não fiquem disponíveis somente nas proximidades do local de coleta, mas sim em qualquer lugar que se queira acessá-las. Basicamente o monitoramento remoto se dá por meio da utilização dessa premissa (Silva, 2018).

A Figura 9 apresenta um conjunto de sensores (acelerômetro, strain gage e termopar) dentre as soluções para o monitoramento da Ponte Pênsil São Vicente durante a troca de cabos de sustentação em São Vicente, São Paulo. Para o acompanhamento da estrutura durante essa operação foram utilizados ao todo 18 sensores medindo vibrações, deformações, inclinações, temperatura, velocidade e direção do vento em tempo real em um sistema de acesso remoto por computadores tablets ou celulares (Guirardi *et al.*, 2016).

Figura 9 - Sistema de sensores Ponte Pênsil São Vicente. Fonte: Guirardi *et al.* (2016).



a) Vista superior



b) Vista lateral

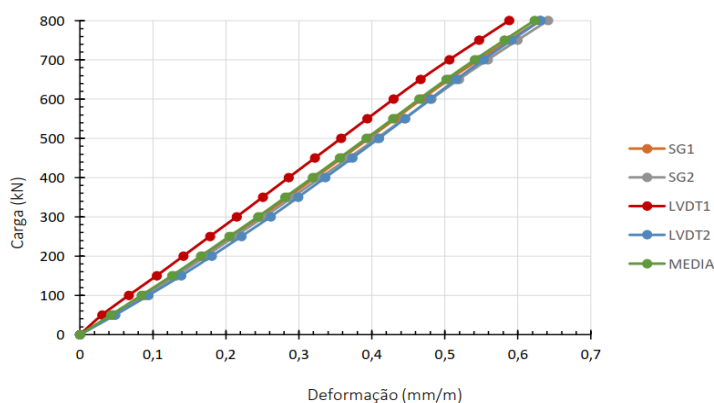
4.1.4 Análise e Interpretação dos Dados

Após a aquisição os dados aferidos são transmitidos e armazenados em um banco localizado em servidor ou em computador local, ou em ambos, a depender do objetivo e do sistema de monitoramento. Dispõe-se aqui de subsistemas de tratamento, análise e visualização de dados, de modo a obter informações úteis. Os equipamentos realizam a tradução das informações de forma que possam ser compreendidos mais facilmente pelo utilizador do equipamento, este valendo-se da interpretação dos resultados para o gerenciamento da estrutura monitorada (Claudino, 2019).

Uma análise primária pode ser realizada automaticamente pelo próprio sistema, com o auxílio de um software, no controle de limites que podem ser pré-definidos, avisando o utilizador caso alguns desses limites sejam ultrapassados. Porém, cabe ao usuário do sistema a análise mais profunda dos dados de forma a obter resultados mais refinados frente aos apresentados primariamente pelo monitoramento. Geralmente, a visualização das informações recolhidas se dá através de gráficos e tabelas que facilitam a compreensão de quem lê-las. A partir daí, posteriormente, é possível definir com mais precisão as intervenções que poderão ser realizadas na estrutura monitorada (Guimarães, 2022; Fraga, 2015).

Como exemplo, na Figura 10 é possível observar um dos gráficos com a curva carga e deformação retirado do trabalho de Pes (2022) obtida da utilização dos sensores extensômetros (SG1 e SG2) e sensores de deslocamento linear (LVDT 1 e LVDT 2) para medir os deslocamentos de pilares em laboratório. A curva verde representa a média dos resultados obtidos dos quatros sensores na pesquisa da autora.

Figura 10 – Gráfico: carga x deformação do pilar. Fonte: Pes (2022).



4.1.5 Fases de aplicação

Existem diferentes abordagens para se avaliar uma estrutura e pode-se classificá-las em três categorias básicas: monitoramento estático, monitoramento dinâmico e identificação do sistema e análise modal, podendo ainda haver a combinação dessas categorias. Cada categoria é caracterizada por vantagens e desafios e qual (ou quais) será utilizada (serão utilizadas) depende principalmente do comportamento estrutural e dos objetivos do monitoramento. Cada categoria pode ser realizada durante períodos curtos e longos, de forma permanente (contínua) ou periodicamente (Fraga, 2015).

A programação e o ritmo do monitoramento dependem da rapidez com que o parâmetro monitorado muda no tempo. Para algumas aplicações, o monitoramento periódico dá resultados satisfatórios, mas as informações não registradas entre duas inspeções são perdidas para sempre (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021). Somente o monitoramento contínuo durante toda a vida útil da estrutura pode registrar seu histórico, ajudar a entender seu real comportamento e explorar plenamente o monitoramento.

4.1.5.1 Fase de execução da estrutura

A construção é uma fase muito delicada na vida das estruturas de concreto, pois as propriedades do material mudam com o envelhecimento. É importante saber se os valores exigidos são ou não alcançados e mantidos. Defeitos (por exemplo, fissuras prematuras) que surgem durante a construção podem ter sérias consequências no desempenho estrutural. Os dados de monitoramento ajudam os engenheiros a entender o comportamento real da estrutura e isso leva a melhores estimativas do desempenho real e ações corretivas mais apropriadas (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

Conforme Lorenzi *et al.* (2021) as informações importantes obtidas através do monitoramento durante a construção incluem: Estimativa do tempo de endurecimento do concreto para estimar quando as tensões de retração começam a ser geradas; medições de deformação durante a idade precoce do concreto para estimar o auto-esforço e o risco de fissuração prematura; quando as estruturas são

construídas em fases sucessivas, a medição pode ajudar a melhorar a composição do concreto quando necessário. No caso de estruturas pré-fabricadas, sensores podem ser úteis para controle de qualidade; otimização entre duas fases sucessivas de vazamento devido à avaliação de cura nas fases anteriores; para estruturas protendidas, o monitoramento da deformação dos cabos ajuda a ajustar as forças de protensão e determinar o relaxamento; o monitoramento do assentamento da fundação ajuda a entender as origens das tensões embutidas; danos causados por cargas incomuns, como tempestades ou terremotos durante a construção, podem influenciar o desempenho final das estruturas; regulação ideal da posição estrutural durante a montagem; melhoria do conhecimento e recalibração de modelos.

A instalação de um sistema de monitoramento durante as fases de construção permite que o monitoramento seja realizado durante toda a vida útil da estrutura. Como a maioria das estruturas precisa ser inspecionada várias vezes durante o serviço, a melhor maneira de diminuir os custos de monitoramento e inspeção é instalar o sistema de monitoramento desde o início, ou seja, embutir os sensores no concreto (Lorenzi *et al.*, 2021).

A degradação e/ou danos materiais são muitas vezes as razões para a renovação de estruturas existentes. Além disso, novas necessidades funcionais (por exemplo, ampliação) levam a requisitos de fortalecimento. Se os elementos de reforço forem feitos de concreto novo, uma boa interação do concreto novo com a estrutura existente deve ser assegurada. A deformação precoce do concreto novo cria tensões internas e a má coesão causa a delaminação do concreto novo, apagando assim os efeitos benéficos dos esforços de reparo ou reforço (Fraga, 2015). Como os novos elementos de concreto observados separadamente representam novas estruturas, as razões para monitorá-los são as mesmas para as novas estruturas, apresentadas na subseção anterior. A determinação do sucesso da reforma ou reforço é uma justificativa adicional.

Algumas estruturas devem ser testadas antes do serviço por razões de segurança ou para verificar seu comportamento. Nesta fase, os níveis de desempenho exigidos das estruturas devem ser alcançados. parâmetros monitorados típicos (como deformação, deslocamento, rotação da seção e abertura de trincas) são medidos. Testes são realizados para entender o comportamento real da estrutura e compará-lo com estimativas teóricas. O monitoramento durante esta fase pode ser usado para

calibrar modelos numéricos que descrevem o comportamento das estruturas (Fraga, 2015).

4.1.5.2 Fase de serviço

A fase de serviço é o período mais importante na vida de uma estrutura. Durante esta fase, os materiais de construção estão sujeitos à degradação pelo envelhecimento. Fissuras e fluências do concreto, e o aço do vergalhão oxida. Conforme Souza *et al.* (2021), a degradação dos materiais é causada por fatores mecânicos (cargas superiores às teoricamente assumidas) e físico-químicos (corrosão do aço, penetração de sais e cloretos no concreto, congelamento do concreto, entre outros). Como consequência da degradação do material, a capacidade, durabilidade e segurança da estrutura diminuem (Lorenzi *et al.*, 2021).

O monitoramento durante o serviço fornece informações sobre o comportamento estrutural sob cargas previstas e também registra os efeitos de sobrecargas imprevistas. Os dados obtidos pelo monitoramento são úteis para detecção de danos, avaliação de segurança e determinação da capacidade residual das estruturas. A detecção precoce de danos é particularmente importante porque leva a intervenções apropriadas e oportunas. Se o dano não for detectado, ele continua a se propagar e a estrutura não garante mais os níveis de desempenho exigidos. A detecção tardia de danos resulta em custos de reforma muito elevados ou, em alguns casos, a estrutura precisa ser fechada e desmontada. Em áreas sísmicas, a importância do monitoramento é mais crítica (Fraga, 2015).

Por fim, quando a estrutura não responde mais aos desempenhos exigidos e os custos de reparação ou reforço são excessivamente elevados, a vida útil final da estrutura é atingida e a estrutura deve ser desmontada. O monitoramento pode ajudar a desmontar estruturas com segurança e sucesso (Lorenzi *et al.*, 2021).

4.2 Sensores

4.2.1 Definição e características

De forma mais precisa, um sensor é um dispositivo que detecta e responde

a algum tipo de entrada do ambiente físico. A entrada pode ser luz, calor, movimento, umidade, pressão ou qualquer outro fenômeno ambiental. A saída é geralmente um sinal que é convertido em uma exibição legível por humanos no local do sensor ou transmitido eletronicamente por uma rede para leitura ou processamento adicional. Eles possibilitam a criação de um ecossistema de coleta e processamento de dados sobre um ambiente específico para que possam ser monitorados, gerenciados e controlados com mais facilidade e eficiência (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

Com os recentes avanços na tecnologia de sensores, os sistemas de monitoramento da saúde estrutural foram desenvolvidos e implementados em várias estruturas civis, como pontes, edifícios, túneis, usinas de energia e barragens. Muitos tipos avançados de sensores com fio e sem fio, foram desenvolvidos para monitorar continuamente a condição estrutural por meio da coleta de dados em tempo real (Lorenzi *et al.*, 2021). No entanto, ainda há um número notável de questões associadas ao uso de sensores de monitoramento das estruturas de concreto que precisam ser discutidas. Para projetar um sistema de monitoramento das estruturas de concreto, uma das missões críticas é descobrir como determinar um tipo apropriado de sensor que possa atender com eficiência aos escopos do sistema de detecção projetado (Souza *et al.*, 2021).

O monitoramento da integridade estrutural depende muito da coleta de medições precisas e de alta qualidade em tempo real da condição do elemento estrutural, comunicando essas informações com o sistema de controle e sinalizando os avisos necessários caso um padrão irregular seja observado. Os sensores para monitoramento da saúde estrutural são projetados para facilitar o processo de monitoramento e capacitar os engenheiros de manutenção com ferramentas de tomada de decisão, que garantirão a segurança da instalação e do público (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021). Um sistema de monitoramento de saúde típico é composto por uma rede de sensores responsáveis por medir diferentes parâmetros relevantes para o estado atual da estrutura, bem como seu ambiente circundante, como estresse, tensão, vibração, inclinação, umidade e temperatura.

No monitoramento os sensores são elementos que têm o primeiro contato com as estruturas de concreto. Eles têm o objetivo de adquirir informações sobre parâmetros como deformação, deslocamento, rotação, fissuras (Isis, 2006).

Conforme Valdés, Medeiros e Macioski (2021), o objetivo do sensor é

detectar a magnitude do parâmetro monitorado e transformá-lo em informações transportáveis (por exemplo, informações ópticas ou elétricas). O transportador conduz as informações do sensor para a unidade de leitura, que decodifica as informações e recupera a magnitude do parâmetro monitorado. A medição é visualizada e apresentada ao operador pela interface do usuário (Fraga, 2015).

Por fim, o subsistema de gerenciamento de dados é necessário para controlar a operação e gerenciar os dados obtidos no monitoramento. Os componentes de um sistema de monitoramento podem ser separados ou combinados de forma diferente (por exemplo, sensor e portador podem fazer um dispositivo) (Lorenzi *et al.*, 2021).

Geralmente, os sensores podem ser discretos ou distribuídos. Sensores discretos podem ter bitola curta ou longa. O sensor discreto detecta o parâmetro observado apenas no local onde está instalado, enquanto o sensor distribuído detecta o parâmetro observado em vários locais da estrutura (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

Os parâmetros monitorados podem ser observados em nível de material ou estrutural. A principal diferença entre esses dois níveis está na estratégia de monitoramento utilizada e no sistema de monitoramento: o monitoramento de materiais fornece informações relacionadas ao comportamento do material, mas informações deficientes sobre o comportamento estrutural; o monitoramento estrutural fornece informações relacionadas ao comportamento estrutural (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

4.2.2 Tipos de sensores

No próximo tópico onde serão tratados os principais tipos de sensores no monitoramento de estruturas de concreto. Embora haja diversos tipos de sensores que não foram mencionados, o que foi apresentado contempla de forma significativa os mais comuns no mercado, e os mais utilizados no monitoramento de estruturas de concreto armado.

O monitoramento das estruturas de concreto pode envolver uma variedade de tipos de sensores para coletar dados relevantes. A escolha dos sensores depende dos objetivos específicos do monitoramento e das características da estrutura em

questão. Muitas vezes, uma combinação de vários tipos de sensores é usada para obter uma visão completa da condição da estrutura. Nesse item, serão apresentados alguns dos tipos mais comuns de sensores utilizados nesse contexto.

4.2.2.1 Sensores de Fibra Óptica

Os sensores de fibra óptica têm estado em grande desenvolvimento nos últimos anos. Na Engenharia Civil, esses sensores podem ser usados para medir diferentes parâmetros. Exemplos incluem deformações, deslocamentos estruturais, frequências de vibrações, aceleração, pressão, temperatura e umidade. O monitoramento da estrutura pode ser local ou global. O foco da abordagem local está no comportamento do material enquanto a abordagem global é atribuída ao monitoramento de todo o desempenho estrutural. Sensores de fibra óptica foram testados para diferentes aplicações, como monitoramento de deformação de componentes de concreto em uma ponte (Lorenzi *et al.*, 2021).

Segundo Fernandes (2016), embora haja vários tipos de sensores em fibra disponíveis no mercado, apenas um número restrito dessas tecnologias e suas aplicações tem sido implementado de maneira satisfatória. Para o autor, apesar de as fibras ópticas oferecerem algumas vantagens, os sensores que utilizam essa tecnologia enfrentam desafios significativos ao competir com tecnologias alternativas, como os sensores eletrônicos, que já estão maduras e consolidadas. A ideia é que, embora as fibras ópticas tenham potencial, sua implementação bem-sucedida como sensores ainda está em um estágio limitado em comparação com alternativas já estabelecidas.

Para esse tipo de sensores tem-se três diferentes configurações de agrupamento: (1) sensores pontuais, (2) multiponto e (3) distribuídos. Para o tipo (1), há a colocação do sensor em um determinado ponto da fibra óptica, e somente neste ponto, onde ocorre a interação dele com o meio. Para os do tipo (2), semelhante aos pontuais, apenas com a diferença que a colocação será realizada em vários pontos de sensoriamento em uma mesma fibra. Por sua vez, para o tipo (3) a fibra por completo está repleta de inúmeros sensores, funcionando como elemento sensor (Fernandes, 2016).

Na Figura 11 está um exemplo de sensor em fibra óptica utilizado para medir deformações em elementos de concreto. Esses sensores segundo a fabricante é do

tipo que deve ser incorporado em estruturas de concreto antes da concretagem para projetos de monitoramento de estruturas.

Figura 11 - Sensor de deformação óptico modelo FS62RSS. Fonte: HBK, 2023.



4.2.2.2 Acelerômetros

Um acelerômetro é um dispositivo eletromecânico usado para medir forças de aceleração através de direções de um ou vários eixos. Essas forças podem ser estáticas, como a força contínua da gravidade em componentes estruturais, ou dinâmicas para detectar movimentos ou vibrações, como quando um caminhão atravessa uma ponte. A aplicação de acelerômetros se estende a várias disciplinas, de smartphones a máquinas rotativas e infraestrutura civil (Lorenzi *et al.*, 2021).

No contexto do monitoramento estrutural, os acelerômetros podem ser usados para monitorar em tempo real as variações das características dinâmicas estruturais devido a danos ou alteração no desempenho estrutural. Os modelos multi-eixos de acelerômetros são usados principalmente para detectar magnitude e direção da aceleração adequada. Os acelerômetros também são amplamente utilizados em construções onde há a necessidade de controlar o comportamento dinâmico da estrutura, seja a curto ou longo prazo (Souza *et al.*, 2021). Em aplicações estruturais, a medição e registro do comportamento dinâmico das estruturas é fundamental para avaliar sua segurança e viabilidade. As cargas dinâmicas podem ser originadas de uma variedade de fontes, como cargas de impacto (por exemplo, queda de detritos), trabalho de construção (por exemplo, cravação de estacas, demolição), cargas de tráfego, terremoto e assim por diante (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

A Figura 12 apresenta um acelerômetro de modelo BWT901 CL comercializado pela empresa WIT Motion. Segundo a empresa está integrado no

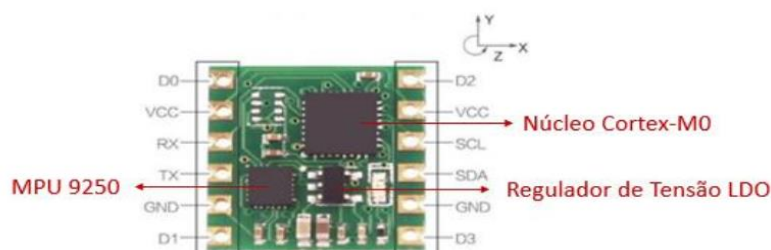
acelerômetro um giroscópio de alta precisão e o sensor de campo geomagnético. A transmissão de dados se dá por porta serial Bluetooth sem fio, com alcance de até 10m, aceitando a possibilidade de também conectar cabo USB Tipo C.

Figura 12 - Acelerômetro BWT901CL. Fonte: WIT (2023).



O BWT901CL é constituído por um MEMS (Micro Electrical Mechanical System), o qual é formado pela integração de elementos mecânicos e circuitos eletrônicos em um chip micrométrico de silício. O acelerômetro da Figura 12 é composto de um chip chamado JY-901 (Figura 13), um regulador linear de tensão Low-Dropout, que garante o suprimento de energia de maneira precisa e estável, e um sensor MEMS MPU9250. O MPU-9250, combina dois módulos em um só, o MPU-6500 e o AK8963. O primeiro consiste em um giroscópio e acelerômetro de 3 eixos, enquanto o segundo consiste em um magnetômetro de 3 eixos (Claudino, 2019).

Figura 13 - Módulo JY-901. Fonte: WIT, modificado por Claudino (2019).



4.2.2.3 Sensores de Fio Vibratório

Os sensores de fio vibratório são uma classe de sensores muito populares para fins de monitoramento geotécnico e estrutural. O principal componente do sensor de fio vibratório é um fio de aço tensionado que vibra, quando pulverizado, em uma frequência de ressonância proporcional à deformação no fio. Esse mecanismo é

usado para medir tensão estática, tensão, pressão, inclinação e deslocamento por meio de várias configurações de sensor. Os sensores de fio vibratório operam com base na frequência de ressonância resultante da vibração, em vez da amplitude, para transmitir o sinal (Fraga, 2015). Portanto, esses sensores são relativamente resistentes à degradação do sinal por ruído elétrico, cabos longos e outras mudanças na resistência do cabo. Eles têm uma estabilidade de longo prazo e amplo uso para monitorar estruturas como barragens, túneis, minas, pontes, fundações, estacas, taludes instáveis e escavações.

Vale ressaltar que os dispositivos medidores de deformação de fio vibratório são amplamente utilizados para medir deformação em aço ou em concreto armado. Eles podem ser facilmente embutidos em concreto para monitorar a deformação em estacas, fundações, barragens, túneis, etc. Os medidores soldáveis a arco são adequados para soldagem a arco em estruturas de aço, como revestimentos de túneis, estacas e pontes (Fraga, 2015).

Além disso, os transdutores de deslocamento de fio vibratório são basicamente projetados para monitorar o movimento de longo prazo em estruturas críticas. Esses sensores são capazes de medir pequenos deslocamentos em juntas e fissuras em concreto, rocha, solo e membros estruturais (Lorenzi *et al.*, 2021). Em essência, o transdutor é composto por um fio vibratório conectado a uma mola de tensão. Quaisquer deslocamentos de elementos estruturais nas proximidades do sensor são acomodados por um alongamento da mola de tensão, que por sua vez produz um aumento proporcional na tensão do fio. Esses sensores são usados principalmente para medidas de abertura de fissuras, por exemplo, em pontes e túneis (Souza *et al.*, 2021).

Por exemplo, o extensômetro de fio vibratório modelo EDS-21V-E, Figura 14, da empresa Encardio Brasil tem como objetivo realizar medições em túneis, barragens e edifícios. Este modelo de sensor de tensão de fio vibratório possui suas extremidades em aço inox, e pode ser embutido diretamente no concreto. O princípio de funcionamento é através da tensão no fio, as alterações da tensão são relacionadas a deformação no concreto por meio da movimentação relativa das extremidades que tendem a modificar os níveis de tensão na corda.

Figura 14 - Sensor de Tensão de Corda vibratória EDS-21V-E. Fonte: Encardio Brasil (2023).



4.2.2.4 Sensores LVDTs

Um LVDT é um sensor eletromecânico usado para medir o deslocamento linear. Pode-se usar o LVDT nas aplicações onde os deslocamentos a serem medidos estão evoluindo de uma fração de mm para poucos cms. Os sensores LVDT são frequentemente usados em aplicações de monitoramento estrutural, como registro de deslocamento em membros estruturais devido a cargas vivas e variações de temperatura (Lorenzi *et al.*, 2021). O LVDT mede com precisão o movimento entre a armadura deslizante com mola e o corpo externo. Essas unidades robustas e independentes são ideais para registrar deslocamentos em membros estruturais devido a cargas vivas e variações de temperatura (Souza *et al.*, 2021).

Para esse sensor o princípio de funcionamento se baseia na mudança da indutância magnética ou da resistência magnética, a qual provém das bobinas que o constitui. Normalmente apresenta um encapsulamento composto por aço inoxidável ou por algum polímero que protegem o transdutor de interferências externas. Outros componentes são carretel, núcleo, fixação, alimentação, adequação e aquisição de sinais (Lenz e Siena, 2013).

Conforme Losito (2010) os sensores do tipo LVDT possuem 3 bobinas coaxiais e concêntricas, e um núcleo móvel composto por material magnético. A bobina mais interna é alimentada por uma corrente alternada de alta frequência. Todos esses elementos estão envoltos em um encapsulamento que os protege. Inicialmente com valor zero de tensão o núcleo se move para posições onde a tensão aumenta ou diminui, a depender da direção de movimento dos elementos secundários, que são enrolamentos em torno da bobina central composta por um

circuito emissor.

Os transdutores da série GT comercializados pela empresa Metrolog permitem analisar deslocamento lineares, com o movimento do êmbolo relativo ao corpo do sensor. Seu princípio de funcionamento, sendo LVDT, está baseada no emprego de rolamentos de alta precisão e durabilidade. Construído em aço inox com elevada vida útil possui diversos modelos entre eles o apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Sensor LVDT série GT. Fonte: Metrolog (2023).



A Figura 16 e a Tabela 1, apresentam respectivamente algumas características dimensionais e informações quanto aos modelos do Sensor LVDT série GT da empresa Metrolog, como comprimento e peso. O termo D1 representa o diâmetro externo do sensor; enquanto L, o comprimento do corpo; B, comprimento da zona sem braçadeira e X, o comprimento da extremidade que sofrerá deslocamento relativo a deformação na estrutura.

Figura 16 - Dimensões Sensor LVDT série GT. Fonte: Metrolog (2023).

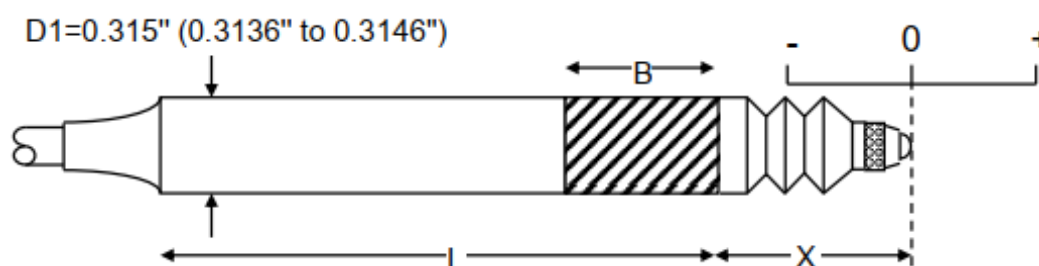


Tabela 1 - Dimensões dos Modelos de Sensores LVDT série GT. Fonte: Metrolog (2023).

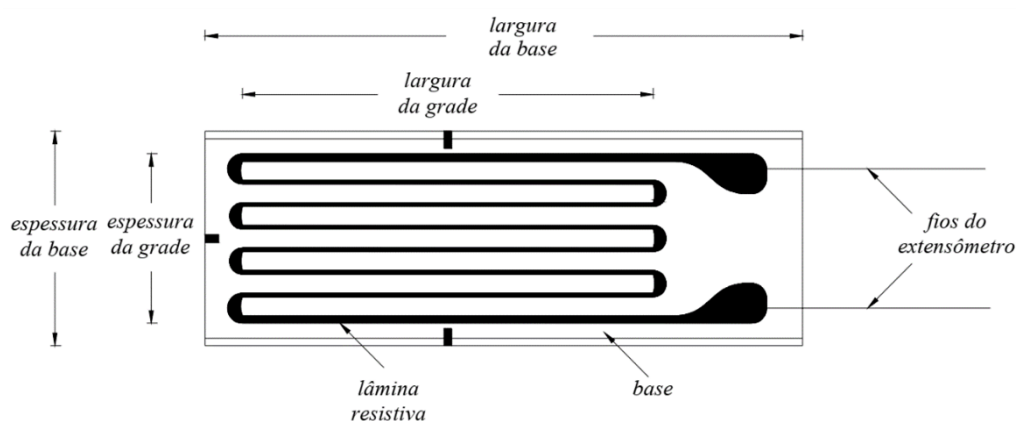
Modelo	L (cm)	X (cm)	B (mm)	Peso (g)
GT0500Z	2,59	0,74	5,08	5,67
GT1000	5,33	1,52	13,97	11,34
GT2500	5,74	2,03	18,03	11,34
GT5000	8,66	2,29	29,97	14,17

4.2.2.5 Stain Gauges

Os medidores de deformação, também chamados de extensômetros (Figura 17), especialmente os *Strain Gauges* que transformam deformação mecânica em sinais elétricos, são conforme Weber (2008) dispositivos capazes de medir pequenas variações nas dimensões de elementos estruturais, e são usados comumente entre os engenheiros de instrumentação.

Diferentes métodos de inspeção não destrutivos para medidas de tensões têm sido explorados e desenvolvidos, mas nenhum outro dispositivo tem uma utilização mais ampla do que os extensômetros com relação à sua aplicabilidade. Isto devido à precisão das medidas, facilidade de manipulação e da capacidade do mesmo de monitorar as deformações até as cargas últimas em ensaios destrutivos (Weber, 2008, p. 01).

Figura 17 - Esquema de confecção dos extensômetros. Fonte: Andolfato *et al*, 2004.



Para Reis *et al.* (2018) entre os mais populares no mercado estão extensômetros os elétricos, pois permitem que computadores realizem a leitura dos dados de deformação medidos pelo dispositivo. Estes extensômetros consistem basicamente em transdutores que convertem os valores de deformação em sinal de resistência elétrica. Uma das desvantagens de se utilizar esse tipo de extensômetro é a sua destruição durante os ensaios, pois como são fixados nos corpos de prova acabam sofrendo a mesma deformação que eles.

Os extensômetros como afirma Weber (2008) fornecem um método excelente de converter deformações em quantidade elétrica. Apresentando as seguintes características:

- Alta precisão de medição;

- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- Fácil utilização;
- Excelente linearidade;
- Medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- Aplicabilidade embaixo d'água ou em atmosferas com gás corrosivo;
- Usados como elementos transdutores para medidas de várias quantidades físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento);
- Possibilita medição em locais remotos.

Os *Strain Gauges* são compostos por uma lâmina metálica resistiva de espessura de algumas micras e fixada em um material eletricamente isolado chamado base. Então, seguido pela soldagem dos fios de saída. Usualmente, extensômetros são feitos para ter uma resistência de 120Ω , mas existem extensômetros disponíveis com resistências de 350Ω , 500Ω , 1000Ω (Andolfato *et al.*, 2004).

4.2.2.6 Células de Carga

Uma célula de carga é um tipo de transdutor usado para converter uma força mecânica como tensão, compressão, pressão ou torque em uma saída elétrica mensurável. Esta saída muda proporcionalmente à força aplicada à célula de carga. As células de carga têm sido empregues para uma variedade de aplicações que exigem exatidão e precisão. Esses sensores são empregados em muitos edifícios históricos, onde vários materiais de construção, como pedra e tijolo, foram usados (Souza *et al.*, 2021).

O tipo mais comum de células de carga usadas no monitoramento estrutural são os dispositivos medidores de deformação. É usado para medir a tensão devido à força aplicada em um objeto. O tipo mais comum é aquele que consiste em um suporte flexível isolante que sustenta um padrão de folha metálica. O medidor é fixado ao objeto por um material adesivo adequado. Quando submetida a força, a folha é deformada, fazendo com que sua resistência elétrica mude, que pode então ser medida. Esses sensores são mais frequentemente utilizados para monitorar a deformação em estruturas de aço e de concreto armado (Souza *et al.*, 2021).

Na Figura 18 está um modelo de mercado de célula de carga C16

tipo *Rocker-Pin* Classe D1 ou C3 comercializado pela empresa HBK, utilizadas em aplicações de força, possuindo pesagem precisas na faixa de 20t até 400t, com classes de precisão de D1 até C5 pela Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML) R60 (HBK, 2023). Segundo a fabricante elas também são adequadas para uso em ambientes adversos, como por exemplo, em balanças rodoviárias ou ferroviárias ou para medição em silos. Possuem batente de rotação, proteção contra raios e variações de cabos robustos oferecem uma proteção adicional.

Algumas características do sensor da Figura 18 estão na Tabela 2, em que estão definidos parâmetros como altura total do sensor (B), altura do fio de transmissão de dados à base (C), diâmetro da peça superior ($\varnothing H$), diâmetro central ($\varnothing I$). Estão também parâmetros como a_{\max} (Desalinhamento máximo admissível) e s_{\max} (Deslocamento lateral máximo admissível da aplicação da carga).

Figura 18 - Célula de Carga C16A Tipo *Rocker-Pin*. Fonte: HBK, 2023.

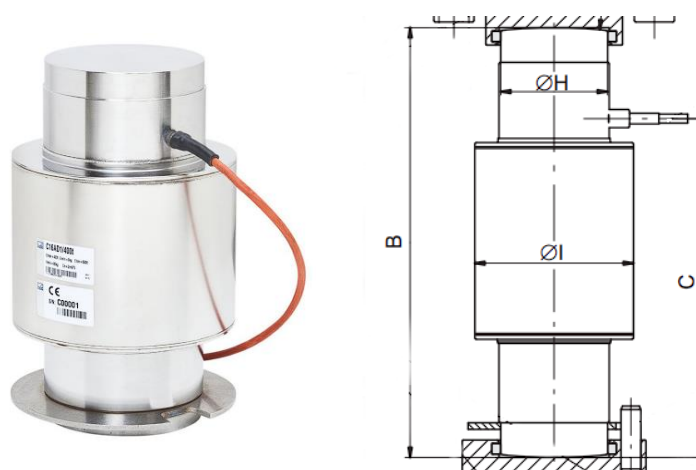


Tabela 2 - Características do sensor R16A. Fonte: HBK, 2023.

Carga Nominal	Peças de Empuxo Superior + Inferior (1 conjunto = 2 peças)	B	C	ØH	ØI	a_{\max}	s_{\max} (mm)
100 t	EPO3/100t, C16/EPU64	260	205	64	95	4°	8
200 t						2°	9
400 t	EPO3/400t, C16/EPU109	260	205	109	154	2°	9
Carga Nominal	Peças de Empuxo Superior + Inferior (1 conjunto = 2 peças)	B	C	ØH	ØI	a_{\max}	s_{\max} (mm)
100 t	EPO3/100t, C16/EPU64	260	205	64	95	4°	8
200 t						2°	9
400 t	EPO3/400t, C16/EPU109	260	205	109	154	2°	9

4.2.2.7 Inclínômetros

Os inclinômetros (também conhecidos como indicadores de inclinação) são instrumentos de precisão usados para monitorar movimentos e deformações do subsolo. Os inclinômetros são projetados para medir a deformação horizontal do subsolo em um poço quando a estabilidade do talude é uma preocupação para taludes naturais, taludes de corte/aterro construídos e projetos de aterro profundo. Um sistema de inclinômetro contém dois componentes principais: invólucro do inclinômetro e sonda de medição do inclinômetro (Lorenzi *et al.*, 2021).

A sonda de medição do inclinômetro é abaixada e levantada através de uma caixa especial do inclinômetro com ranhuras usinadas com precisão que controlam a orientação do sensor e fornecem uma superfície uniforme para medições. Os inclinômetros geralmente são instalados em um poço; no entanto, eles também podem ser enterrados em uma vala (inclinômetros horizontais), lançados em concreto ou presos a uma estrutura. (Souza *et al.*, 2021).

Os inclinômetros são normalmente usados para: (a) determinar se os movimentos de subsuperfície são constantes, acelerando ou respondendo a medidas corretivas; (b) verificar se as deformações do subsolo estão dentro dos limites de projeto, se as escoras e ancoragens estão funcionando conforme o esperado e se os edifícios vizinhos não são afetados pelos movimentos do solo; e (c) acompanhar perfis de assentamento de taludes, fundações e outros componentes estruturais (inclinômetro horizontal) (Fraga, 2015).

Suas principais características são:

- Precisão: Capacidade de fornecer leituras precisas da inclinação ou movimento angular.
- Resolução: A menor mudança mensurável na inclinação que o inclinômetro pode detectar.
- Estabilidade: Capacidade de manter a calibração e precisão ao longo do tempo.
- Comunicação de Dados: Capacidade de transmitir dados de inclinação para sistemas de monitoramento, muitas vezes por meio de tecnologias como Bluetooth ou cabos.
- Durabilidade: Resistência a desgaste e deterioração ao longo do tempo, garantindo uma vida útil prolongada.

Os inclinômetros, também chamados de sensores de inclinação, clinômetros ou sensores de inclinação, são projetados para medir o ângulo de um objeto em relação à força da gravidade. Esses medidores de inclinação ou nível determinam o ângulo de inclinação e/ou rotação e emitem esses valores através da interface elétrica apropriada (Lorenzi *et al.*, 2021). Os inclinômetros medem o ângulo de orientação de um objeto em relação à força da gravidade. Isso é feito por meio de um acelerômetro, que monitora o efeito da gravidade sobre uma pequena massa suspensa em uma estrutura elástica de suporte (Souza *et al.*, 2021).

Quando o dispositivo se inclina, essa massa se move levemente, causando uma mudança de capacitância entre a massa e a estrutura de suporte. O ângulo de inclinação é calculado a partir das capacitâncias medidas. Um tiltmeter, por exemplo, é um inclinômetro sensível usado para monitorar mudanças muito pequenas na inclinação de uma estrutura. Os dados medidos fornecem um histórico preciso do movimento de uma estrutura, que pode ser usado para alerta precoce de possíveis danos estruturais. Os sensores são capazes de medir ângulos de inclinação (ou inclinação), elevação ou depressão de um objeto em relação à direção da gravidade. Esses sensores são adequados para monitorar a rotação de estruturas como barragens de concreto ou muros de contenção (Valdés, Medeiros e Macioski, 2021).

A Figura 19 apresenta um esquema de instalação e algumas características de um inclinômetro com extensômetro de fibra ótica. Onde (A) mostra a montagem do inclinômetro em campo; (B) mostra um corte transversal onde é possível identificar as camadas que envolvem a Sonda Inclinométrica; (C) está mostrando o plano de orientação do inclinômetro e a conexão com o cabo de fibra ótica e por fim (D) mostra como se baseia a operação de um inclinômetro em campo.

O procedimento de instalação de inclinômetros geralmente segue estas etapas:

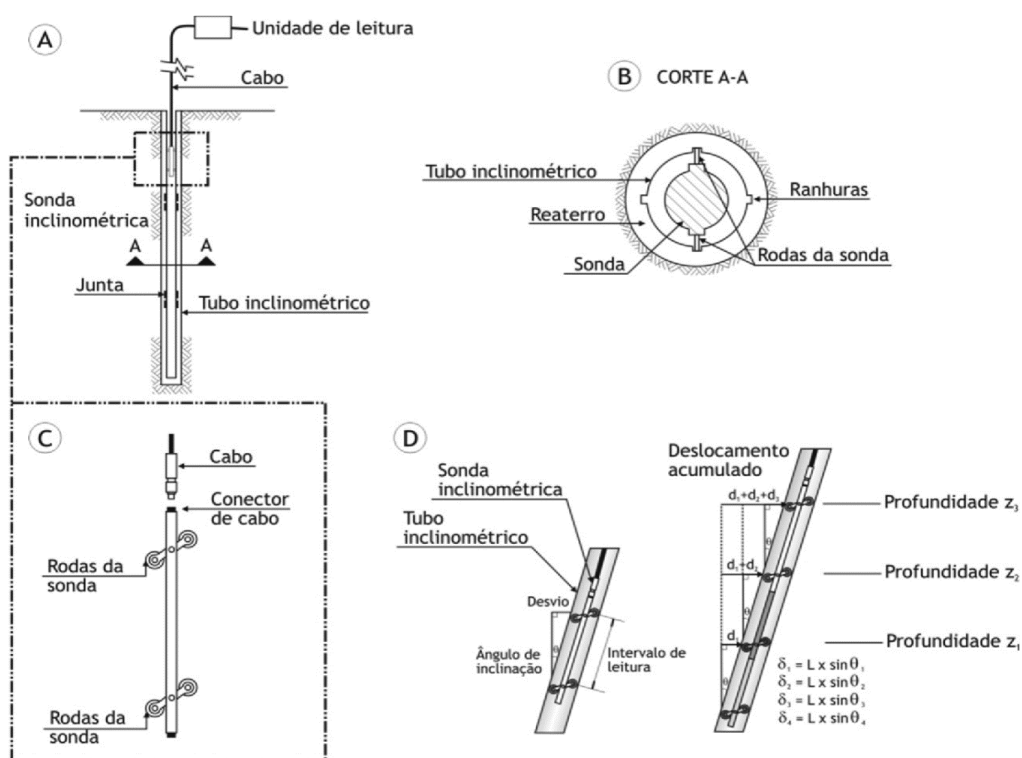
1. Seleção do local: Identificação de locais estratégicos na estrutura onde a inclinação deve ser monitorada.
2. Preparação da superfície: Limpeza e preparação da superfície para garantir uma aderência adequada do inclinômetro.
3. Furação: Perfuração de furos adequados na estrutura para a instalação dos inclinômetros.
4. Inserção dos Inclinômetros: Colocação cuidadosa dos inclinômetros nos furos,

garantindo que estejam firmemente fixados.

5. Fixação adequada: Fixação dos inclinômetros usando materiais adequados para garantir estabilidade.
6. Calibração: Calibração dos inclinômetros para garantir precisão nas leituras. Isso pode incluir ajustes para compensar eventuais desvios.
7. Conexão e configuração: Conexão dos inclinômetros ao sistema de monitoramento, se aplicável, e configuração dos parâmetros de coleta de dados.
8. Testes iniciais: Realização de testes iniciais para verificar se os inclinômetros estão fornecendo leituras corretas.
9. Registro e documentação: Documentação detalhada da instalação, incluindo localização, profundidade dos furos, ângulos de instalação e outros detalhes relevantes.
10. Monitoramento contínuo : Início do monitoramento contínuo da inclinação ao longo do tempo.

É fundamental seguir as instruções fornecidas pelo fabricante do inclinômetro e, em muitos casos, contar com profissionais qualificados para garantir uma instalação precisa e confiável.

Figura 19 - Instalação de inclinômetro com extensômetro de fibra ótica. Fonte: Pinto (2015).



4.2.2.8 Sensores de Emissão Acústica

Os sensores de Emissão Acústica (EA) medem sinais de energia de alta frequência que são gerados a partir de fontes locais de ondas de estresse. Descontinuidades e defeitos em um material geram ondas de tensão. Os sensores EA são capazes de captar as ondas de tensão propagadas para a superfície do material. Ao converter essas ondas em sinais elétricos, os sensores EA são dispositivos ideais para avaliar efetivamente o estado atual dos materiais sob estresse. Esses sensores são usados principalmente para detectar o aparecimento ou crescimento de trincas existentes em componentes estruturais (Fraga, 2015).

Segundo Silva (2016) os estudos das emissões em materiais que sofreram deformações plásticas em serviço permitiu chegar às seguintes conclusões:

- a) A amplitude da onda resultante depende da intensidade e da velocidade do evento: a emissão produzida por uma trinca formada em um evento rápido e discreto possui amplitude maior do que aquela produzida por uma trinca de mesmo tamanho formada em um processo lento e contínuo;
- b) A deformação plástica reorganiza a distribuição de tensões no interior de uma peça, transferindo para outras regiões o carregamento que produziu a deformação. Por isso, a emissão produzida uma vez não é produzida novamente se a peça é descarregada e então carregada até a intensidade de carregamento anterior. Esse fenômeno é observado em regiões sem defeitos ou em regiões com defeitos insignificantes, sendo conhecido como efeito Kaiser;
- c) Em defeitos estruturalmente significantes, novos carregamentos da peça produzem novas emissões acústicas em valores de carregamento inferiores ao máximo já aplicado à peça. Esse é o chamado efeito Felicity.

Na Figura 20 está um modelo comercial de sensor de emissão acústica da empresa *Physical Acoustics*, o R6A, para uso geral. Esse é um sensor com alta sensibilidade, usinado a partir de uma haste sólida de aço inoxidável, tornando o sensor extremamente robusto e confiável. A face de contato com a estrutura é de cerâmica. Devido a ser compacto ele é pode ser utilizado em espaços apertados para monitoramento.

Figura 20 - R6A Sensor EA de uso geral de 60 khz. Fonte: Physical Acoutics (2023).



4.2.2.9 Anemômetros

Um anemômetro é um dispositivo que mede a velocidade do vento de forma confiável e simples. Existem quatro tecnologias comuns que estão comercialmente disponíveis. No mercado são encontrados anemômetros de tipo concha, sônico e hélice, além de fio quente a laser – que são utilizados para medição em líquidos. Um anemômetro considerado mecânico geralmente é construído com várias conchas, que são presos aos braços horizontais e conectados a uma haste vertical (De Castro e Rubio, 2018). Assim, quanto mais forte o vento sopra, mais rápido os copos giram e os braços horizontais se movem. Este movimento é traduzido em um sinal elétrico por meio de um gerador, que é então convertido no valor instantâneo da velocidade. Alguns anemômetros mecânicos contam quantas rotações ocorrem durante um intervalo específico e então aplicam uma relação para estimar a velocidade.

Um anemômetro baseado em ultrassom (sônico) possui vários pares de transmissores e receptores de som que são montados formando ângulos de 90 graus. Conforme o vento afetará alguns dos feixes sonoros, ou seja, causará um desvio de sua trajetória, eles chegarão um pouco antes ou depois dos demais; assim, a diferença de velocidade pode ser usada para detectar a velocidade do vento. A tecnologia a laser também foi usada para construir anemômetro (De Castro e Rubio, 2018). Este é baseado em interferômetro a laser, que mede a velocidade da seguinte forma: usando um feixe de laser e dividindo-o em dois por meio de um espelho, podem ser gerados dois feixes, um deles é usado como referência e não é submetido ao vento, enquanto o outro (feixe de medição) é afetado; então, recombinando os dois feixes, um padrão de referência pode ser obtido (Rocha, 2021). Cada vez que o feixe de medição é

afetado pelo vento, produz-se uma ligeira alteração do padrão, que é conhecido como conjunto de franjas de interferência. A velocidade do vento é estimada medindo-se os espaços das referidas franjas.

Na Figura 21 está um exemplo de anemômetro sônico de cabeça horizontal nomeado como HS-50 e comercializado pela Sigma Sensores. Segundo a empresa esse anemômetro foi projetado para aplicações de pesquisa científica que exigem informações precisas de velocidade e direção do vento de 3 eixos. O HS-50 monitorará as velocidades do vento de 0 a 45 m/s, com uma taxa de amostragem rápida de 50 Hz. O instrumento pode ser posicionado perto do solo ou das copas das árvores para uma medição precisa da turbulência da superfície. O HS-50 possui uma construção robusta de aço inoxidável, que garante a estabilidade a longo prazo e a adequação para uso em ambientes extremos (Sigma, 2023).

Figura 21 - Anemômetro sônico horizontal HS-50. Fonte: Sigma Sensores, 2023.



4.2.2.10 Termopares

As estruturas de Engenharia Civil estão sujeitas às mudanças ambientais e, portanto, é necessário medir a temperatura que afeta as propriedades físicas das estruturas em certa medida. Os termopares são um dos sensores de temperatura mais utilizados para medir as variações de temperatura em determinados pontos da estrutura (Lorenzi *et al.*, 2021). A maioria das grandes estruturas de concreto usa sensores de temperatura, durante a moldagem e durante a construção, para ter um controle total sobre as mudanças de temperatura.

Sobre as variações térmicas, elas podem provocar segundo Bastos (2019)

as movimentações de origem térmica, as variações naturais nas temperaturas dos ambientes causam a variação de volume das estruturas e fazem surgir conseqüentemente esforços (tensões) adicionais. Estruturas sujeitas a constantes variações de temperatura podem estar suscetíveis a deformações repetitivas, que causam fadiga nos materiais e o aparecimento de fissuras, as quais são facilitadoras a penetração de agentes danosos a estrutura.

Medidas preventivas para evitar a fissuração devido a efeitos térmicos na massa do concreto, pode se dar fundamentalmente de duas formas. Primeiramente, quando o concreto está em estado fresco é aconselhável utilizar cimentos com baixo calor de hidratação ou resfriar a massa de concreto se esta for de grande volume como ocorre no na construção de barragens. Por outro lado, se for sobre estruturas sujeitas a grandes variações de temperatura, é necessário criar juntas de dilatação em distâncias convenientes. Outras soluções podem melhorar a resistência à fissuração por variações térmicas através de protensão ou reforço de concreto com fibras (Canovas, 1994, p. 136).

Esse tipo de sensor possui em sua constituição dois fios de metais diferentes. Em seu funcionamento esses dois fios são unidos em suas extremidades. Uma delas é aquecida enquanto a outra permanece geralmente em temperatura ambiente. Os fios são percorridos por uma corrente contínua com a criação de um circuito. Caso haja interrupção no circuito em seu centro, a tensão proveniente desse circuito aberto (tensão *Seebeck*) é função do gradiente de temperatura entre as extremidades e dos tipos de materiais empregados. A temperatura é obtida pela relação direta entre a tensão termoelétrica e a diferença de temperatura (Deus, 2018).

Existem vários tipos de sensores termopares comerciais. Pela categoria, os termopares de metal nobre podem ser R, S ou B; os termopares padronizados de metal base, K, J, N, E ou T. Há ainda alguns que não são definidos por letras. A principal diferença entre os de base e os nobres é que este possui platina na sua composição e aqueles possuem níquel (Moreira, 2002). A faixa de temperatura medida por cada tipo de sensor apresenta algumas distinções, Tabela 3.

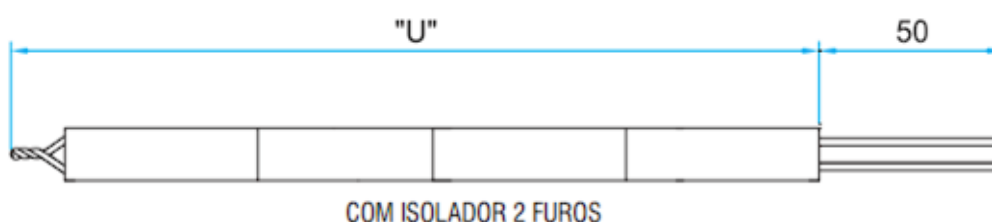
A Figura 22 mostra um sensor comercial termopar básico (TCB11) da empresa *Alutal Measure & Trust*, que possui isolamento para ambos os fios. “U” representa o comprimento do sensor em mm. O comprimento sobressalente de 50

mm é para conexão com os demais elementos do sistema de monitoramento. Quanto as calibrações podem ser do tipo J, K, T, R, S e B, e a bitola dos fios variam de 8 a 27 AWG. O sensor TCB11/K08/U:1000, por exemplo, pode ser identificado como termopar convencional básico com isoladores de 2 furos, tipo K, simples, bitola 8 AWG, comprimento “U” = 1000mm.

Tabela 3 - Limites de erros para termopares. Fonte: Moreira (2002).

Sensor	Faixa de utilização (°C)	Limite de Erro (Escolher o maior)	
		Padrão	Especial
E	0 - 870	± 1,7 °C ou 0,5%	± 1 °C ou 0,4%
	-200 a 30	± 1,7 °C ou 1%	-
J	0 - 760	± 2,2 °C ou 0,75%	± 1,1 °C ou 0,4%
K, N	0 - 1260	± 2,2 °C ou 0,75%	± 1,1 °C ou 0,4%
	-200 a 30	± 2,2 °C ou 2%	-
T	0 - 370	± 1 °C ou 0,75%	± 0,5 °C ou 0,4%
	-200 a 30	± 1 °C ou 1,5%	-
R, S	0 - 1480	± 1,5 °C ou 0,25%	± 0,6 °C ou 0,1%
B	870 - 1700	± 0,5%	-

Figura 22 - Termopar convencional básico com isolador 2 furos (TCB11). Fonte: Alutal, 2023.



4.2.3 Funcionamento básico dos sensores

Existem sensores cinemáticos que monitoram estruturas através de medições de aceleração, velocidade e deslocamento. Esses sensores são compostos por acelerômetros, dispositivos que detectam oscilações e movimentos devido a vibrações que causam variações na aceleração da estrutura sob observação.

No monitoramento de estruturas de concreto, são comuns quatro tipos de acelerômetros:

- Capacitivo: Estes acelerômetros utilizam variações na capacitância para medir a aceleração. Alterações na distância entre as placas capacitivas resultam em medições precisas;
- Piezoelétrico: A sensibilidade dos piezoelétricos à deformação é

aproveitada para medir a aceleração. Quando aplicada pressão, esses dispositivos geram uma carga elétrica proporcional à aceleração;

- Equilíbrio de Forças: Através do princípio do equilíbrio de forças, esses acelerômetros medem a aceleração comparando-a com a força da gravidade. A aceleração é calculada pela diferença entre as forças medidas;
- Dispositivos Microeletromecânicos (MEMS): Pequenos e altamente sensíveis, esses acelerômetros MEMS são amplamente utilizados devido ao seu tamanho compacto e precisão. Eles operam com base em estruturas microscópicas que respondem às forças e deformações, convertendo-as em informações sobre a aceleração.

Esses acelerômetros desempenham um papel crucial no monitoramento e na avaliação da integridade de estruturas de concreto, permitindo a detecção e análise de movimentos e vibrações que podem indicar problemas potenciais.

Outra forma de captar os movimentos induzidos pelas fontes anteriormente mencionadas é através dos sensores de velocidade. Em termos gerais, são usados dois tipos diferentes de sensores de velocidade em monitoramento das estruturas de concreto: os baseados no efeito Doppler e seus homólogos eletromecânicos. Um sensor de velocidade de base eletromecânica é composto por um ímã permanente e duas bobinas suspensas em torno dele (De Castro e Rubio, 2018). De acordo com a lei de Faraday, quando os fios de uma bobina interagem com um ímã permanente, é produzida uma corrente elétrica cuja intensidade depende da velocidade com que as bobinas cortam o campo magnético do ímã permanente, ou seja, quanto mais as bobinas se movem, maior será a corrente produzida. Assim, a saída deste sensor é obtida subtraindo os sinais criados pelas duas bobinas (Rocha, 2021).

Além disso, alguns aplicativos podem exigir o uso de medidas de deslocamento para detectar recursos adicionais que podem ser usados para a identificação de danos. A cerca disso, os sistemas de monitoramento das estruturas de concreto usam um transdutor de base resistiva, LVDT ou satélites de posicionamento global (GPS) para medir o deslocamento de uma estrutura civil (De Castro e Rubio, 2018).

Já os sensores mecânicos funcionam a partir da detecção de fadiga, medição da força aplicada, corrosão e trincas. A detecção de fadiga é uma das falhas

mais comuns encontradas em infraestrutura civil, especialmente pontes (Rocha, 2021). Essa falha começa nas zonas que experimentam estresse significativo que têm imperfeições microscópicas, os quais levam ao aparecimento de pequenas fissuras cujo comprimento e profundidade evoluem até comprometerem a integridade ou a segurança.

Além disso, a medida da força aplicada em partes críticas de uma estrutura civil às vezes é necessária, pois essas partes são projetadas para lidar com até um valor máximo; se a força aplicada exceder este valor, é provável que gere ciclos desnecessários de estresse, o que, em consequência, levará a uma deterioração acelerada (De Castro e Rubio, 2018). Para isso, geralmente são utilizadas células de carga. São um dispositivo transdutor que convertem a força aplicada em um sinal elétrico; embora possam ser utilizados diferentes tipos de células de carga, a mais comum é uma célula composta por dispositivos medidores de deformação, onde o sinal elétrico é obtido por meio de um circuito de instrumentação conhecido como Wheatstone Bridge. Conforme Valdés, Medeiros e Macioski (2021), o princípio de funcionamento pode ser resumido da seguinte forma: quanto maior a força aplicada, maior a resistência; assim, a tensão resultante diminuirá seu valor. Este tipo de células de carga é o preferido, pois podem realizar medidas dinâmicas e estáticas.

Para medir as deformações em estruturas são colados os extensômetro, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto. Deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Assim, isto leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação (Weber, 2008).

Uma das consequências mais comuns da aplicação de uma força em qualquer objeto sólido é sua deformação. A medição da deformação é um meio de se obter as modificações ocorridas em um objeto e, geralmente, é detectada usando extensômetros, transdutores piezoelétricos e extensômetros de fio vibratório. Um extensômetro altera seu valor de resistência quando submetido a uma força externa provocadora de deformações no objeto.

Em relação ao transdutor piezoelétrico é produzido um sinal elétrico proporcional à deformação do objeto (De Castro e Rubio, 2018). Quanto ao fio vibratório, é por meio da frequência de ressonância do fio que se estima a

deformação. Este dispositivo é composto por duas placas que possuem um fio tensionado entre elas; ao aplicar uma força externa, as placas se movem causando uma mudança na tensão do fio, portanto, alterando sua frequência de ressonância. Um circuito eletrônico, que pode ser uma bobina e um amplificador lock-in, pode ser usado para ativar e medir a frequência (Rocha, 2021).

A corrosão é um dos parâmetros mais importantes que afetam o desempenho e a vida útil da infraestrutura civil moderna, em particular das pontes. Ela pode passar despercebida por anos ou mesmo décadas, até que ocorram falhas graves que afetem a integridade estrutural da estrutura (De Castro e Rubio, 2018). Assim, é necessário desenvolver sensores e metodologias que sejam capazes de monitorizar continuamente esta propriedade de forma a poder detectá-la no seu estado mais precoce, para que as ações corretivas necessárias sejam mais eficientes e econômicas.

Nas últimas décadas, a detecção de trincas e sua quantificação são uma área atrativa para experimentação. As fissuras são provocadas por corrosão, pelas forças excessivas que causam fadiga nas partes estruturais, entre outros motivos. Os sensores mais utilizados para detectar trincas são EA, dispositivos medidores de deformação e termografia. Um sensor ativo baseado em EA usa um transdutor piezoelétrico cuja intensidade do sinal depende se a estrutura possui fissuras ou não. Em contraste, o sensor passivo aplica uma onda sonora à estrutura em teste e mede a onda rebatida para quantificar sua força; em teoria, quanto mais baixo o sinal, mais profunda a fissura.

O anemômetro utilizado usa um sistema datalogger que armazena os dados no formato.txt em um cartão de memória de 2GB – nessas configurações, pode-se realizar medidas ininterruptas por 2 anos) (Santa Ritta, 2019).

Os sensores ambientais como os anemômetros buscam medir que ocorrem com frequência no meio. Um anemômetro mecânico é composto de alguns braços com conchas presas nas pontas. Conforme de Castro *et al.* (2018) eles medem a velocidade do vento por meio da velocidade de rotação provocada pelo deslocamento de ar. Este movimento é traduzido em um sinal elétrico por meio de um gerador, que é então convertido no valor instantâneo da velocidade.

Por sua vez outros anemômetros como o do tipo ultrassom possui pares de transmissores e receptores de som (parecidos com garras) que são montados

formando ângulos de 90 graus. A medição é feita ao se comparar as mudanças de trajetória das ondas sonoras, em que alguns feixes podem chegar um pouco antes ou depois dos demais; assim, a diferença de velocidade pode ser usada para detectar a velocidade do vento.

Outro tipo é o anemômetro a *laser*, consoante de Castro *et al* (2018), esse sensor com essa tecnologia funciona com base na interferência dos feixes de *laser* para obter a velocidade do vento. O feixe é dividido em dois, sendo um dele tido como referência, ou seja, sem contato com o ar; e o outro submetido as interferências do vento. Ao combiná-los é possível obter o padrão de referência (Rocha, 2021).

A temperatura pode fornecer informações sobre as condições internas da estrutura, como fadiga, fissuras e escoamento. Além disso, como alguns sensores são afetados pela temperatura, sua medição torna-se uma preocupação importante para aplicar as correções apropriadas para obter medições confiáveis (De Castro e Rubio, 2018). Para isso, são utilizados diversos sensores, incluindo termopares, detector de temperatura por resistência, termografia, entre outras tecnologias. Os termopares usam o efeito seebeck para medir a temperatura. Este efeito descreve que quando dois metais diferentes são unidos em suas extremidades e submetidos a uma diferença de temperatura (T_1), uma tensão será produzida. A magnitude da tensão dependerá dos metais utilizados (T_2 e T_3). A corrente resultante precisa ser condicionada, pois tem uma amplitude muito baixa (Rocha, 2021).

Conforme Valdés, Medeiros e Macioski (2021), é necessário conhecer as temperaturas T_2 e T_3 para estimar T_1 ; além disso, geralmente é empregado um circuito específico baseado em amplificador operacional para instrumentar este transdutor. Os RTDs (Detectores Resistivos de Temperatura) são sensores compostos por um pedaço de fio inerte (geralmente de platina) envolto por um invólucro de cerâmica ou vidro. Esses sensores são um dos mais precisos, pois possuem uma relação linear entre resistência e temperatura. Seu circuito de condicionamento utiliza uma fonte tensão-fixada, e devido a relação acima mencionada, qualquer alteração na tensão indicará uma variação da temperatura. Finalmente, a energia infravermelha pode ser considerada como uma medida da temperatura de um objeto. Para medir essa energia, são utilizadas câmeras termográficas. Eles podem ser feitos de dispositivos de carga acoplada (CCD) que capturam os fótons emitidos na faixa de comprimento de onda desejado (9–14 μm).

5 ALGUNS ESTUDOS COM O USO DE SENSORES

5.1 Monitoramento da temperatura e de deformações relativas induzidas por corrosão em uma viga de concreto armado (Guimarães, 2022)

O concreto, como as pedras naturais, apresenta alta resistência à compressão, o que faz dele um excelente material para ser empregado em elementos estruturais primariamente submetidos à compressão, como por exemplo os pilares, mas, por outro lado, suas características de fragilidade e baixa resistência à tração restringem seu uso isolado em elementos submetidos totalmente ou parcialmente à tração, como tirantes, vigas, lajes e outros elementos fletidos. Para contornar essas limitações, o aço é empregado em conjunto com o concreto, e convenientemente posicionado na peça de modo a resistir às tensões de tração (Bastos, 2019, p. 01).

Com a adoção do aço na composição das estruturas de concreto o padrão de construção elevou-se, tornando possível a concepção de estruturas cada vez mais robustas. No entanto, além dos benefícios, com o uso do aço, questões relacionadas à integridade estrutural passaram a ser discutidas com mais frequência, dado que estruturas complexas são mais suscetíveis a danos.

Conforme Guimarães (2022) a corrosão é uma das principais e mais comuns manifestações patológicas das estruturas de concreto armado, onde atingem a armadura, corroí-a e diminui sua secção. Além de ser responsável por outros danos como o destacamento e o aparecimento de fissuras. Por isso, é cada vez mais importante o estudo de manifestações patológicas e durabilidade das construções. O entendimento do comportamento estrutural promove economia acerca de ações de manutenção e tratamento de danos.

O objetivo geral do trabalho desenvolvido foi a criação de um sistema de monitoramento de baixo custo, capaz de obter dados sobre a corrosão de armaduras, por meio de sensores, além de dados sobre temperatura e deformação. Para isso, foi utilizada em uma viga de concreto armado (Figura 23) exposta a solução salina um sistema de sensores.

A Figura 24 mostra a distribuição dos sensores de deformação (SG01, SG02, SG03, SG04, SG05 e SG06) na armadura da viga antes de realizar a concretagem. Foram instalados três sensores nas barras longitudinais negativas da armadura e outros três nas barras positivas, intercalando as posições.

A viga foi submetida a ciclos de molhagem e secagem com solução salina

com um teor de 10% de NaCl. Esse índice de salinidade elevado não interferiu nas considerações do trabalho, dado que o objetivo é provocar a corrosão e não reproduzir uma situação real.

Figura 23 - Viga de concreto armado. Fonte: Guimarães (2022).

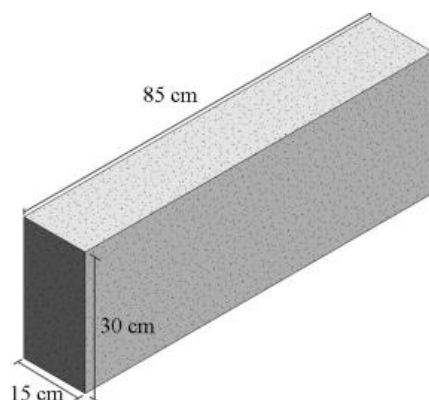
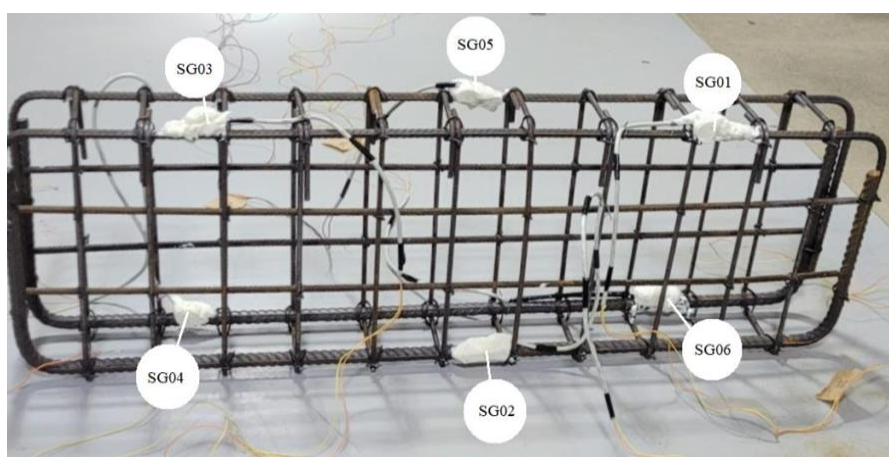


Figura 24 - Disposição dos sensores. Fonte: Guimarães (2022).



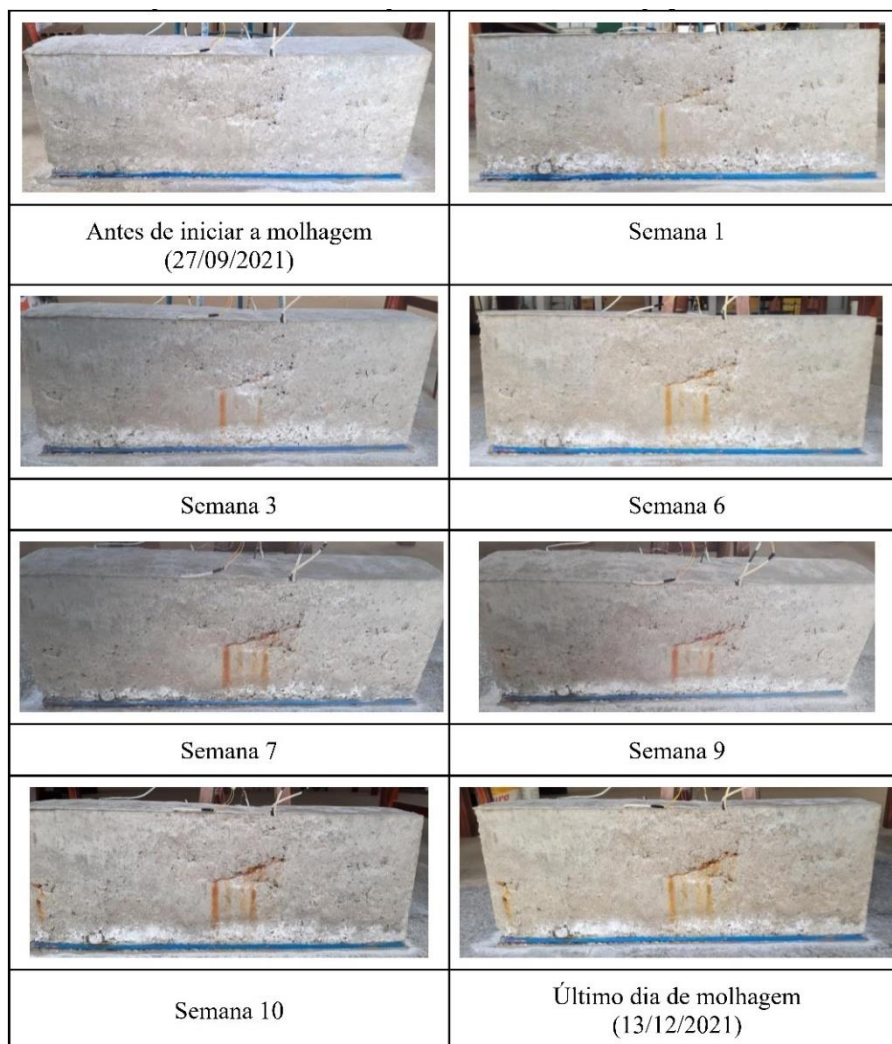
Com uma análise visual, Figura 25, constatou-se a presença e o avanço da corrosão na armadura, apenas nos pontos de aplicação dos sensores. Indicando possível percolação da água pelo cabo do sensor, facilitando a degradação e o acúmulo de umidade.

Durante os procedimentos verificou-se o bom funcionamento do sensor de temperatura, diferente dos sensores de deformação, que apresentaram variações nos valores devido a fatores externos como umidade e temperatura. Os *strain gauges* SG02, SG03 e SG04 foram os únicos que permaneceram em funcionamento.

Apesar de não ter sido possível estabelecer matematicamente uma equação de relação entre temperatura do concreto e as deformações captadas pelos sensores; o protótipo mostrou-se funcional e foi bem-sucedido em monitorar a corrosão,

mensurando as deformações, apesar de necessitar de otimização, tanto em relação a instalação, quanto a qualidade dos sensores. Recomenda-se, portanto sensores de deformação mais robustos.

Figura 25 - Deterioração da viga ao longo das semanas. Fonte: Guimarães (2022).



5.2 Análise do desempenho térmico de habitações de interesse social construídas em paredes de concreto: um estudo de caso em Tucuruí – PA (Santos; Gouveia, 2018).

Conforme Moreno (2013 *apud* Santos *et al.*, 2018), observa-se que a produção de habitações de interesse social em seu caráter tipológico e construtivo, ocorre em processo de série, sem que haja qualquer adequação a diversos contextos, dentre eles o climático. Este fato é corroborado pelo Programa Minha Casa Minha Vida, do Governo Federal, o qual emprega um padrão nacional de projeto, em que as

vedações geralmente são constituídas por paredes de concreto. Entretanto, devido às especificidades do clima em cada região, o desempenho térmico das unidades habitacionais pode ser inferior ao mínimo estabelecido pela norma de desempenho vigente no Brasil (NBR 15575:2013).

O município de Tucuruí – PA, localizado na região amazônica, detém características climáticas específicas. Conforme o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, se destaca o período de seca entre os meses de junho a novembro, quando as precipitações são reduzidas e observam-se altas temperaturas e também elevada umidade relativa do ar. Para Lamberts et al. (2014) *apud* Santos et al (2018) tais fatores, quando combinados, prejudicam o desempenho térmico de edificações e proporcionam desconforto térmico ao ser humano. Ademais, o uso de equipamentos elétricos de refrigeração e/ou ventilação é frequente no município, o que causa um consumo elevado de energia elétrica por parte do setor residencial de seu núcleo urbano.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho térmico de habitações de interesse social do Conjunto Habitacional Vivacidade – CHV, localizadas no município de Tucuruí – PA e que foram executadas com paredes de concreto armado moldadas in loco. Tal avaliação é efetuada de acordo com as recomendações da NBR 15575:2013 – regulamentadora de edificações habitacionais. Além disso, o estudo procede a uma análise comparativa entre o sistema de vedação empregado no estudo de caso e o sistema convencional típico da região (paredes de alvenaria com blocos cerâmicos), a fim de fornecer subsídios para a escolha de soluções construtivas em futuros projetos no município.

Para o desenvolvimento da pesquisa, realizou-se a sequência de etapas apresentada na Figura 26. Vale ressaltar que na etapa de avaliação de desempenho da habitação estudo de caso, foram utilizados como base três métodos desenvolvidos conforme a NBR 15575-1:2013.

Na avaliação do desempenho térmico pelo método informativo, para o levantamento dos dados referentes à temperatura do ar foram utilizados dois modelos distintos de aparelhos: três termômetros de globo modelo POL-2000, fabricados pela Politerm, utilizados nas medições em ambientes internos da habitação e um termo higrômetro digital da fabricante J. Prolab, empregado na aferição de temperaturas externas conforme Figura 27. O posicionamento dos sensores está representado por

círculos pretos na Figura 28.

Figura 26 - Etapas da realização da pesquisa. Fonte: Santos e Gouveia (2018).

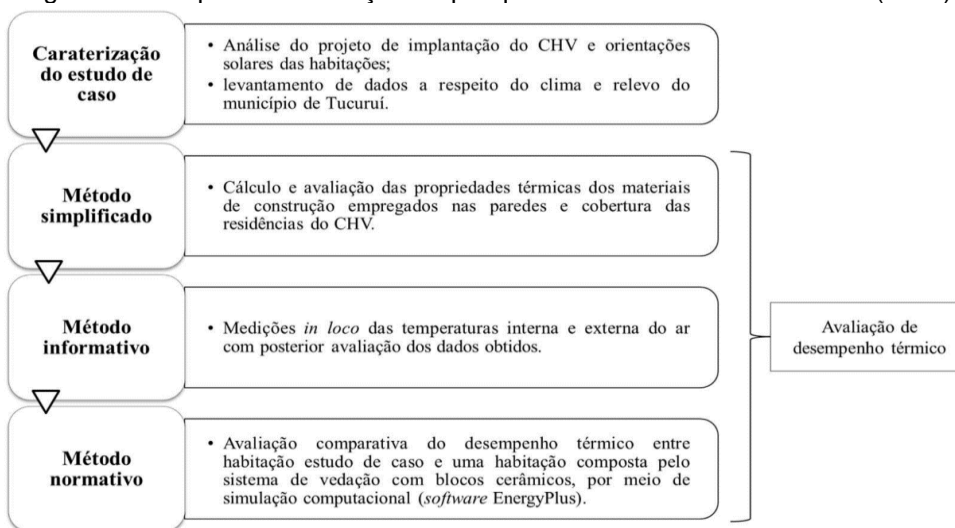
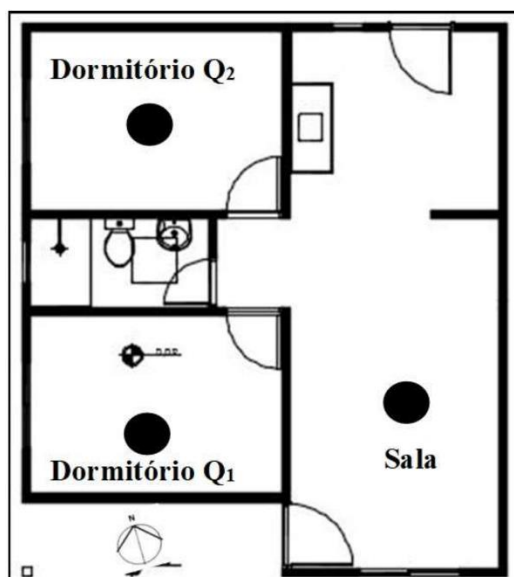


Figura 27 - Sensores Utilizados: (a) Termômetro Globo, (b) Termo higrômetro digital. Fonte: Santos e Gouveia (2018).



Figura 28 - Localização dos sensores. Fonte: Santos e Gouveia (2018).



Os dados registrados foram analisados e procedeu-se o tratamento estatístico das temperaturas do ar no exterior da habitação. A Tabela 4 apresenta os valores máximos, médios e mínimos de temperatura, assim como o desvio padrão dos dados, constatando que os dias tiveram características climáticas semelhantes, atendendo assim ao requisito da NBR 15575-1:2013 para o procedimento de medição.

Tabela 4 - Valores máximos, médios e mínimos de temperatura do ar exterior no período de medição in loco. Fonte: Santos e Gouveia (2018).

Ambiente:	Área externa				
Data	30/09/2015 Temp. (°C)	01/10/2015 Temp. (°C)	02/10/2015 Temp. (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão
Temp. máxima	33,4	35,0	33,6	34,0	0,87
Temp. média	31,1	30,8	30,7	30,9	0,21
Temp. mínima	28,5	27,4	26,1	27,3	1,20
Amplitude térmica	4,9	7,6	7,5	6,7	1,53

No interior da edificação, durante a maior parte do período de medição, as temperaturas apresentavam valores superiores aos aferidos na área externa, chegando a ultrapassá-la em 2,5°C às 17:00h na sala. A partir dos dados apresentados, verificou-se que as oscilações das temperaturas no exterior são percebidas com algum atraso no ar interno.

O procedimento informativo de medição de temperaturas in loco é essencial na compreensão dos fenômenos térmicos no interior da edificação. Após a realização de todos os procedimentos necessários para tal, a avaliação de desempenho é dada pela seguinte condição: a temperatura interna máxima ($T_{i,máx.}$) deve ser menor ou igual à temperatura externa máxima ($T_{e,máx.}$).

Sendo assim, a unidade habitacional apresentou desempenho insatisfatório para o período típico de verão na zona bioclimática oito, pois o valor máximo de temperatura interna registrado (35,6°C) foi superior ao máximo registrado na área externa (35,0°C), ou seja, não atendeu às condições expressas na NBR 15575-1:2013.

Para otimizar o desempenho dever-se-ia verificar com mais rigor as questões de projeto, uma vez que em Tucuruí as condições climáticas não são favoráveis à boa performance térmica das edificações, com tendência a proporcionar desconforto por calor aos seus usuários. Quando comparadas às paredes de alvenaria, as paredes de concreto não agregam benefícios para a região em estudo, principalmente do ponto de vista ambiental, uma vez que seu processo de produção causa notáveis impactos ao meio ambiente e, portanto, sua utilização não é recomendada para a região em

estudo.

5.3 Procedimento de instrumentação de um viaduto de concreto com sensores *strain gauges* – Estudo de caso (Garcia *et al*, 2020)

A verificação da vida útil de uma Obra de Arte Especial (OAE) depende do histórico de cargas passantes ao longo do período de utilização desde a sua concepção. As cargas que ultrapassam os limites considerados para o dimensionamento fazem com que o dano por fadiga acelere, o que, em um estágio avançado, pode levar à ruptura parcial ou total da estrutura.

A maior parte das pontes no Brasil foi construída na década de 60, seguindo normas e combinações de eixos que eram vigentes naquela época. Atualmente, após cerca de 60 anos, houve a introdução de muitos modelos de veículos de carga no mercado, resultando em um aumento do peso por eixo e, por conseguinte, do Peso Bruto Total (PBT). Isso ressalta a necessidade de monitorar o desempenho da estrutura e sua vida útil para assegurar a segurança não apenas da via em si, mas especialmente dos usuários.

O presente artigo tem como objetivo apresentar as informações necessárias e o processo executivo da instrumentação de sensores B-WIM (*Bridge Weigh-In-Motion*, sistema de transdutores capaz de captar a carga do veículo ao se deslocar sobre a estrutura de uma ponte e registrar a deformação sofrida por ela) em um viaduto com longarinas de concreto protendido, localizado na BR 101, km 212, no município de Palhoça, no estado de Santa Catarina. Foram apresentadas as tecnologias dos sensores utilizados, bem como o sistema de aquisição de dados e o processo de instalação.

Para a coleta destes dados com maior acurácia, foram selecionados sensores de deformação de alta sensibilidade e específicos para estruturas de concreto. Os sensores selecionados são do tipo *strain gauge*, modelo ST350. Foram utilizados 32 sensores e sua instalação foi realizada em locais estratégicos que possibilitassem a obtenção de dados de deformações causadas por esforços de flexão e de cisalhamento resultantes da estrutura.

Além dos 32 sensores de deformação, no viaduto de concreto também fo-

ram instalados sensores para a aferição e o monitoramento da temperatura em diferentes posições. Dessa forma, de modo a monitorar a variação da temperatura no tabuleiro do viaduto, próximo aos sensores *strain gauges*, dois sensores termopares do tipo K foram instalados. A Figura 29 apresenta a posição em planta de cada equipamento e sensor.

Os dois sensores termopares foram posicionados na parte central e na extremidade de uma longarina do viaduto, próximo ao aquisitor de dados. Já os dois sensores de detecção veicular foram instalados no tabuleiro do viaduto, sendo um em cada faixa da pista de rolamento.

A nomenclatura utilizada nos sensores *strain gauges* foi conforme sua finalidade, número de série e respectivo canal no sistema de aquisição de dados. Como, por exemplo, o sensor FAD7174.29, no qual FAD refere-se a sua finalidade de utilização (Tabela 5), 7174 é o número de série do sensor. A Figura 30 apresenta o procedimento de instalação de um sensor WC, responsável por medir as deformações resultantes dos esforços cisalhantes, e a Figura 29 é o canal em que o sensor está conectado ao aquisitor de dados.

Tabela 5 - Função e posição de instalação dos sensores. Fonte: Garcia *et al.* (2020).

Sensor	Função	Posição	Inclinação
WC	Medir as deformações resultantes dos esforços cisalhantes	Posicionados a 25 cm da extremidade da longarina	45°
WM	Responsáveis pela pesagem dos veículos através das deformações relacionadas ao momento fletor	Posicionados a 14 cm a partir da face lateral das longarinas, no meio do vão	0
FAD	Responsáveis pela detecção dos eixos dos veículos	Posicionados sob o tabuleiro, a 25 cm da viga de intertravamento central e centralizado entre longarinas	45°
Termopar tipo K	Monitoramento da temperatura da estrutura durante a coleta de dados	Posicionados a 25 cm da viga de intertravamento e da extremidade do alargamento da alma.	0
Detector de veículos	Detecção de veículos que trafegam sobre a estrutura	Posicionados a 25 cm da viga de intertravamento central e deslocado lateralmente em relação ao sensor FAD	0

Figura 29 - Instalação dos sensores strain gauges. Fonte: Garcia *et al.* (2020).

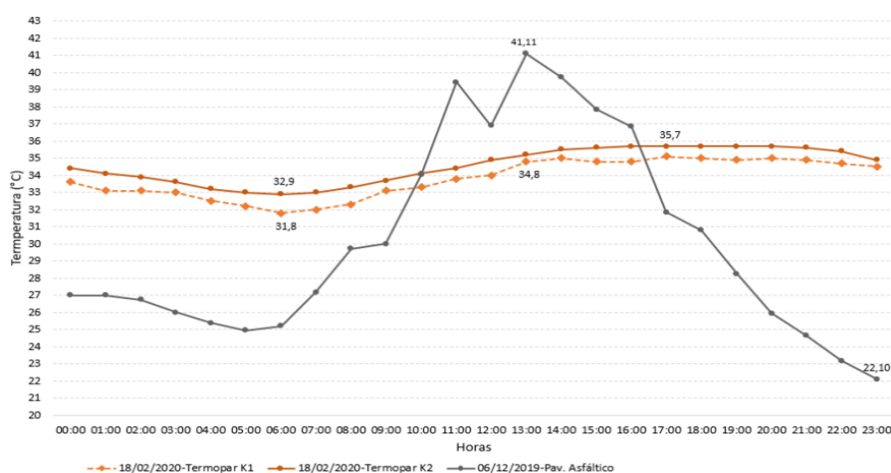


Figura 30 - Posição em planta dos equipamentos e sensores na OAE de Palhoça/SC. Fonte: Garcia *et al.* (2020)

a exemplificar os dados de temperatura coletados, alguns deles foram avaliados de forma conjunta com temperaturas registradas em uma superfície de pavimento asfáltico, que possui um grande potencial de variação de temperatura.

A Figura 31 apresenta os dados coletados na OAE instrumentada, em que a temperatura máxima na Grande Florianópolis foi de 35°C. Como forma de comparação entre a distribuição diária da temperatura na estrutura de concreto com o comportamento da temperatura no pavimento asfáltico, os dados coletados no viaduto foram relacionados com a temperatura na superfície do pavimento asfáltico localizado em um trecho experimental na cidade de Araranguá/SC, coletados no dia 06/12/2019, apenas para visualização da amplitude das temperaturas sob o viaduto e no pavimento asfáltico.

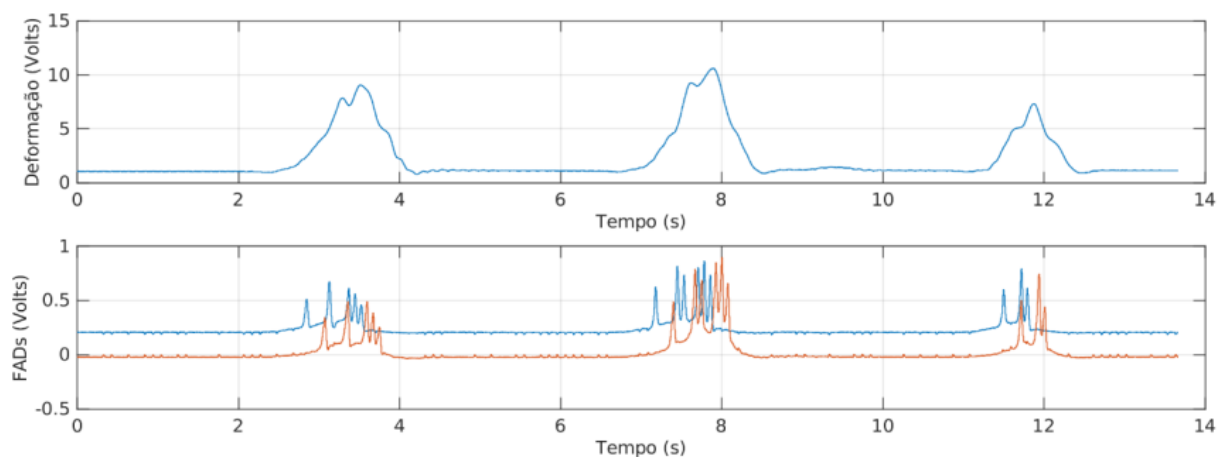
Figura 31 - Variação de temperatura na OAE e na superfície do pavimento. Fonte: Garcia *et al.* (2020).



A partir da temperatura coletada, pode-se perceber que há uma maior estabilidade na temperatura medida no tabuleiro da OAE, enquanto no pavimento asfáltico, há uma maior variação da temperatura ao longo do dia, especialmente no período de maior intensidade solar.

Para exemplificar a etapa de pré-processamento de dados, na qual, a partir do sinal bruto coletado, são identificados e isolados eventos de passagem individual de veículos, a Figura 32 apresenta um trecho do sinal coletado pelos sensores no dia 09/09/2020. Nessa figura, a primeira imagem apresenta o sinal de deformação por flexão medido por um sensor WM instalado em uma das longarinas e na segunda imagem está apresentado o sinal dos sensores FADs instalados sob a pista da direita.

Figura 32 - Sinais obtidos com a passagem de veículos. Fonte: Garcia *et al.* (2020).



A partir da análise do sinal é possível identificar a passagem de um veículo de 5 eixos (caracterizado pelos 5 picos), seguido por um veículo de 6 eixos e, por fim, um de 3 eixos. Para esse intervalo coletado. Na etapa de pré-processamento de dados é necessário o tratamento dos sinais de forma a isolar cada evento individual e, só assim, é possível aplicar a metodologia B-WIM propriamente dita.

O propósito da instrumentação da OAE com o sistema B-WIM é analisar as condições de estabilidade e de resistência da estrutura à medida em que ela está submetida ao tráfego normal. Como prospecção dessa instrumentação, foram obtidos coeficientes de segurança e características estruturais importantes do viaduto, como Linhas de Influência (LI) reais; distribuição do carregamento de tráfego para diferentes componentes estruturais; e avaliação experimental do Fator de Amplificação Dinâmica (DAF), que corresponde ao efeito dinâmico do carregamento proveniente de cargas móveis do tráfego, dentre outras informações.

O sistema de pesagem B-WIM apresenta-se como uma nova tecnologia de grande impacto no monitoramento de rodovias e na manutenção das estruturas. Os sensores são reutilizáveis e de fácil instalação, além de não necessitarem de interdição da via para a instalação. A análise conjunta de dados provenientes do sistema B-WIM, como por eixo, classificação de veículos, contagem de tráfego, controle de velocidade e os dados estruturais de segurança das OAEs podem ser utilizadas pelos órgãos de controle de forma a otimizar a fiscalização e a segurança aos usuários.

6 RESULTADOS

O monitoramento de estruturas de concreto pode levar a construções mais eficientes economicamente, seguras e duráveis, com maior confiabilidade e desempenho. Abaixo estão alguns aspectos por meio dos quais isso é possível:

1. Manutenção preventiva – monitoramento contínuo permite a identificação precoce de problemas antes deles se tornarem mais graves.
2. Prolongamento da vida útil – o monitoramento regular promove a permanência das condições ideais da estrutura por mais tempo, adiando a necessidade de intervenções mais severas, o que significa economia de recursos a longo prazo.
3. Redução de custos de manutenção – a identificação precoce de problemas estruturais evita reparos emergenciais, reduzindo custos de manutenção a longo prazo, tornando as construções mais econômicas.
4. Aumento da segurança: monitoramento permite identificar qualquer risco de colapso iminente ou outras questões de segurança. Isso ajuda a garantir que as estruturas estejam seguras para ocupação e uso, evitando acidentes graves.
5. Melhoria no desempenho estrutural: o monitoramento contínuo fornece dados sobre o desempenho estrutural real das construções, auxiliando na otimização da construção.
6. Maior confiabilidade: a capacidade de monitorar estruturas e demonstrar seu desempenho ao longo do tempo aumenta a confiança dos investidores, proprietários e reguladores.
7. Sustentabilidade: ao promover o prolongamento da vida útil das estruturas, o monitoramento contribui para a sustentabilidade, reduzindo a necessidade de construção e demolição frequentes, o que reduz o impacto ambiental.
8. Adaptação a mudanças climáticas: o monitoramento pode ajudar a identificar e mitigar os impactos das mudanças climáticas, como inundações ou terremotos, tornando as construções mais resistentes a esses desafios.

Dessa forma, percebe-se que o monitoramento de estruturas de concreto não

apenas fornece informações valiosas para a manutenção e segurança, mas também tem o potencial de utilização dos recursos financeiros de forma mais eficiente, e contribuir para uma construção mais segura e sustentável. Isso se torna essencial para atender a demanda crescentes da sociedade por construções mais conscientes e racionais.

Em geral, são obtidos três tipos de variáveis físicas: cinemáticas, mecânicas e ambientais. Variáveis cinemáticas são amplamente utilizadas para determinar o estado global de saúde da estrutura, onde o uso de sensores de velocidade angular está se tornando popular para realizar a localização de danos em localizações específicas da estrutura.

Em relação às variáveis mecânicas, elas são mais utilizadas no monitoramento das estruturas de concreto para infraestrutura civil, pois são medidas algumas propriedades do material como fadiga, deformação e força aplicada, que são importantes para avaliar a integridade do material e os limites de operação. Além disso, à medida que os materiais se degradam devido à força aplicada ou às condições ambientais, a medição de corrosão e trincas também é realizada. Em combinação, essas propriedades podem ser usadas para estimar a vida útil restante das partes críticas da estrutura e, portanto, da estrutura. Já as variáveis ambientais, em particular a temperatura e o vento, são usadas para compensar os desvios que algumas propriedades apresentam sob condições de variação.

Embora algumas das tecnologias de sensores mais recentes tenham sido usadas para o monitoramento das estruturas de concreto em aplicações de engenharia civil, elas devem ser mais exploradas em situações reais, a fim de avaliar completamente os benefícios e desafio potenciais que elas apresentam. Nesse sentido, sensores ópticos são essenciais para analisar produtividade em ambiente onde a quantidade de luz no espaço de trabalho tem um papel fundamental.

Por outro lado, sensores como os de fibra óptica ou os piezocerâmicos têm a capacidade de ser incorporados em partes vitais da estrutura, permitindo o desenvolvimento de materiais autossensíveis. Isso significa que tais sensores podem detectar mudanças nas condições estruturais em tempo real, fornecendo dados valiosos para a manutenção preventiva e a segurança a longo prazo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo destaca a vitalidade do monitoramento estrutural para garantir segurança e durabilidade em estruturas civis. Reflete sobre a relevância da construção civil em diversas esferas da sociedade, destacando a importância de uma gestão eficaz em todas as fases da vida das estruturas. Enfatiza o papel essencial do monitoramento na otimização de operações, manutenção e reparos, usando dados confiáveis para embasar decisões. O texto aborda a prevenção de danos, a maximização das propriedades dos materiais e o prolongamento da vida útil das estruturas por meio de investimentos em monitoramento. Além disso, destaca a necessidade crítica de monitoramento em casos como o colapso de barragens, evidenciando suas implicações sociais, econômicas e ambientais. O texto conclui ressaltando os benefícios do monitoramento, como manutenção preventiva, sustentabilidade, aumento da segurança e adaptação a mudanças climáticas, destacando a importância contínua da inovação em tecnologias de sensores para aprimorar o monitoramento estrutural e construir estruturas mais seguras e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

Alutal Measure & Trust. **Termopar Convencional Básico - Série TCB**. Disponível em: < <https://www.alutal.com.br/br/produto/termopar-convencional-basico-serie-tcb> >. Acesso em: 08 de agosto de 2023.

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. **Controle Tecnológico Básico do Concreto**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2002.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. de. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista (USP), 2004.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. 139f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1997.

ANDRADE, Rodolfo Giacomim M. de. **Monitoramento de curta duração de uma ponte curva em concreto armado: um estudo de caso**. 2012. 144f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2012.

ASSIS, Wayne Santos de. **Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil**. 2007. 265f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16747: Inspeção predial – Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento**. Rio de Janeiro, 2020. p. 20.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. p. 256.

BASHEER. P. A. M. et all. An Interaction Model for Causes of Deterioration and Permeability of Concrete. In: **Concrete Technology: Past, Present and Future, Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium**, 1994. p. 213- 225.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamento do Concreto Armado: notas de aula**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2006.

BASTOS, P. S. S. Fundamentos do concreto armado. **Universidade Estadual Paulista**, 2019.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro, 1995.

BIOLCHINI, Jorge Calmon et al. **Scientific research ontology to support systematic review in software engineering**. Advanced Engineering Informatics, v. 21, n. 2, p. 133-151, 2007.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. Patologia de estruturas. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2019.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Concreto armado, eu te amo, para arquitetos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

BRANDÃO, Ana Maria da Silva. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. 1998. 137f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CANOVAS, Manuel F. Patologia y Teraupeutica del Hormigón Armado. 3ª ed. Universidad Politécnica de Madrid. Madri, 1994.

CASTRO, Bruno Dorneles de; RUBIO, Juan Carlos Campos. **Metodologias avançadas de monitoramento de integridade estrutural (SHM) em materiais compósitos: uma revisão bibliográfica**. 2018.

CLAUDINO, Thiago Koerich. **Monitoramento de carregamentos estáticos e dinâmicos em estruturas utilizando tecnologias IOT**. 2019. 54f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, Bacharelado em Engenharia Mecatrônica, Departamento de Metal Mecânica, Florianópolis, 2019.

DEUS, Mariana Pimenta Adaixo de. **Desenvolvimento de um sensor de temperatura do tipo termopar via aprendizagem baseada em problemas**. 2018. 31f. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais, Ouro Preto, 2018.

ENCARDIO BRASIL. **Sensor de Tensão de Corda vibratória EDS-21V-E**. Disponível em: < <https://www.encardiobrasil.com.br/solucao/1/153/sensor-de-tensao-de-corda-vibratoria-eds-21v-e> >. Acesso em: 02 de agosto de 2023.

FERNANDES, Cindy Stella. **Desenvolvimento de sensores baseados em fibra óptica para monitoramento estrutural**. 2016. 96f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2016.

FRAGA, Francisco de Sales. **Monitorização de edifícios Patrimoniais**. 2015, 226f. Dissertação (mestrado) – Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Especialização em estruturas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal: Porto, 2015.

GARCIA, Emmanuelle S. H. *et al.* **Procedimento de instrumentação de um viaduto de concreto com sensores *strain gauges*** – Estudo de caso. In: Congresso Nacional do Concreto, 62., Anais do 62º Congresso Brasileiro de Concreto – CBC2020. Santa Catarina: Florianópolis, 2020.

GARCIA, Renan et al. **Mapeamento sistêmico da aplicabilidade da análise de confiabilidade em sistemas de monitoramento estrutural**. Revista Cereus, v. 13, n. 2, p. 136-149, 2021.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.

GIONGO, José Samuel. **Concreto Armado: Introdução e propriedades dos materiais**. São Paulo: São Carlos, 2007.

GROSSI, M. V. F. **Inspeção e recebimento de obras**. São Paulo: Editora Leud, 2021.

GUIMARÃES, Wéllida de Assis. **Monitoramento de temperatura e deformações induzidas por corrosão em uma viga de concreto armado**. 2022.

GUIRARDI, Daniel M.; Oliveira, I. de Lima. **Monitoramento da Ponte Pêncil de São Vicente durante a troca de cabos de sustentação**. In: Encontro Nacional de Engenharia e Consultoria Estrutural - ENECE, 19., São Paulo, 2016.

HBK Fibersensing. **Célula de Carga C16A Tipo Rocker-Pin**. disponível em: < <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B03329.pdf>>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.

_____. **Data sheet FS62RSS Rugged Strain Sensor**. disponível em: < <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B05035.pdf>>. Acesso em: 20 de julho de 2023.

HELENE, Paulo R. Do Lago. **Manual de reparo, proteção e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo, Red Rehabilitar, 2003.

ISIS e SANCO. **An Introduction to Structural Health Monitoring**. Module 5. Prepared by ISIS Canada and SAMCO Network of the European Commission. Canadá, 2006. Disponível em: < https://www.samco.org/network/download_area/teaching_mat_2.pdf>. Acesso em: 13 de ago de 2023.

KAEFER, Luís Fernando. **A Evolução do Concreto Armado**. São Paulo. Dezembro, 1998.

LAPA, José Silva. **Patologia, Recuperação e Reparo das Estruturas de Concreto**. Monografia para a especialização em construção civil, Belo Horizonte, 2008.

LORENZI, Luciani Somensi et al. **Monitoramento de estruturas de concreto armado através de ensaios ultrassônicos**. Brazilian Journal of Development, v. 7,

n. 7, p. 72942-72960, 2021.

MARQUES, L. N. M. V. **Monitorização Estática e Dinâmica: Aplicações**. 2007. 202f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Civil, Materiais e Reabilitação da Construção, Escola de Engenharia - Universidade de Minho, Braga, 2007.

METROLOG. **Sensor LVDT série GT**. Disponível em: < <https://www.wit-motion.com/9-axis/witmotion-bluetooth-2-0-mult.html> >. Acesso em: 20 de agosto de 2023.

MOREIRA, Lúcia. **Medição de Temperatura Usando-se Termopar**. Revista Cerâmica Industrial, v.7, n. 5, p. 51-53. ISSN 1413-4608. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657157f8c9d6e028b467d/pdf/ci-7-5-587657157f8c9d6e028b467d.pdf> >. Acesso em: 08 de ago de 2023.

NEPOMUCENO, Antônio A. **Mecanismo de transporte de fluidos no concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 793-827, 2005.

OLIVEIRA, G. Y. da S.; FERREIRA, B. E. DOS S.; GUEDES, J. F.; BARBOSA, E. S. **Análise de ataques por cloretos em concreto leve estrutural com argila expandida**. In: Congresso Brasileiro de Patologias das Construções, Fortaleza, 2020.

PANNONI, Fabio Domingos. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 5 ed. Coletânea do uso do aço – Gerda, 2011.

PES, Fernanda Petry. **Investigação de uma técnica alternativa para monitoramento de deformações em estruturas de concreto armado**. 2022. 106f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Feral do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

PHYSICAL ACOUSTICS. **R6A - Sensor AE de uso geral de 60 khz**. Disponível em: <<https://www.physicalacoustics.com/by-product/sensors/R6a-60-kHz-General-Purpose-AE-Sensor> >. Acesso em: 03 de agosto de 2023.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. **Estruturas de Concreto**. São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/cv714/introducao.pdf> >. Acesso em: 25 nov de 2022.

PINTO, Flavia Gomes. **Inclinômetro instrumentado com fibra óptica para monitoramento de encostas**, 2021. Revista Militar de Ciência e Tecnologia - CIT, v. 32, n. 3, p. 47–61, 2021. Versão on-line: ISSN 2316-4522.

PRAVIA, Z. M. C; BETINELLI, E. A. **Conceitos, Estudos de Casos e Falhas em Estruturas Metálicas. Construção Metálica**. São Paulo, 2016.

REIS, G. de M.; TONETE, R. J.; NOGUEIRA; R. B. **Desenvolvimento de Extensômetro Para Ensaio Mecânico de Tração**. In: XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Maceió: ENEGEP, 2018.

ROCHA, Levi Freire da. **O uso de aprendizado de máquina para o monitoramento de estruturas da construção civil**. 2021.

SANTA RITTA, Ramon Egídio Lepeck. **Deteção da ação dos ventos sobre estruturas de engenharia utilizando sensores acelerômetros**. 2019. 85f. Monografia (Graduação). Projeto Cartográfico apresentado, Curso de Engenharia Cartográfica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SANTOS, M. B.; GOUVEIA, F. P. **Análise do desempenho térmico de habitações de interesse social construídas em paredes de concreto**: Um estudo de caso em Tucuruí – PA. Revista de Engenharia Civil, n. 55, p.5-18, 2018, e-ISSN 2795-5982. Disponível em: <https://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n55/Pag.5-18.pdf> . Acesso em: 18 de set de 2023, 2018.

SANTOS, Roberto Eustáquio. **Inclinômetro instrumentado com fibra óptica para monitoramento de encostas**, 2021. Revista Militar de Ciência e Tecnologia - CIT, v. 32, n. 3, p. 47–61, 2021, e-ISSN 2316-4522.

SIGMAMA SENSORES. **Anemômetro de cabeça horizontal**. Disponível em: < <https://sigmasensors.com.br/produtos/anemometro-de-cabeca-horizontal> >. Acesso em: 06 de setembro de 2023.

SILVA, João Batista Lamari Palma e. **Desenvolvimento de sistema para monitoramento de estruturas com utilização da plataforma Arduino**. 2018. 163f. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Campinas: PUC-Campinas, 2018.

SILVA, Vinícius Costa e *et al.* **Uso de ondas mecânicas em ensaios não destrutivos na aviação**: o *tap test* e o ensaio de emissão acústica. Universidade de Taubaté - ITAU, Taubaté, 2016.

SOUSA, Nilton Lopes Israel. **Desenvolvimento de sistema sensorial ótico para o Monitoramento contínuo da integridade de estruturas**. 2021.

SOUZA, Régis Marciano de *et al.* **Avaliação da resistência característica a compressão em estruturas de concreto a partir de ensaios não destrutivos**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 6, p. 59614-59632, 2021.

TOMAZELI, A.; MARTINS, F. de C. **Condomínio Central Park Ibirapuera: a importância de um laudo técnico para a obtenção da excelência na recuperação das fachadas em edifícios**. Concreto e Construções, São Paulo, Nº 49, p.15, jan/mar, 2008.

VALDÉS, Analiet Calvo; MEDEIROS, Marcelo HF; MACIOSKI, Gustavo. **Sensor de corrosão para monitoramento de estruturas de concreto armado: Testes em corpos de prova de concreto armado.** Revista ALCONPAT, v. 11, n. 3, p. 64–87-64–87, 2021.

WEBER, Albano Luiz. **Metrologia e Instrumentação.** Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2008. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20extensometria.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2023.

WIT Motion. **Acelerômetro BWT901CL.** Disponível em: < <https://www.wit-motion.com/9-axis/witmotion-bluetooth-2-0-mult.html> >. Acesso em: 18 de agosto de 2023