



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE – CCTS
CAMPUS VIII - ARARUNA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MELQUISEDEQUE COSTA PESSOA SILVA

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO DE UMA PONTE SITUADA ENTRE O
MUNICÍPIO DE CACIMBA DE DENTRO E SOLÂNEA - PB**

ARARUNA

2022

MELQUISEDEQUE COSTA PESSOA SILVA

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO DE UMA PONTE SITUADA ENTRE O
MUNICÍPIO DE CACIMBA DE DENTRO E SOLÂNEA - PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual da Paraíba, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientadora: Prof^ª. Bel. Karina dos Santos
Fernandes Souza.

ARARUNA

2022

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586a Silva, Melquisedeque Costa Pessoa.
Análise das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado [manuscrito] : estudo de caso de uma ponte situada entre o município de Cacimba de Dentro e Solânea - PB / Melquisedeque Costa Pessoa Silva. - 2022.
69 p.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2022.
"Orientação : Prof. Esp. Karina dos Santos Fernandes Souza , Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."
1. Pontes. 2. Conservação. 3. Análise de estrutura. I. Título
21. ed. CDD 624.2

MELQUISEDEQUE COSTA PESSOA SILVA

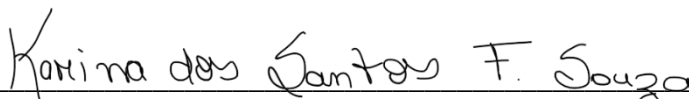
**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO DE UMA PONTE SITUADA ENTRE O
MUNICÍPIO DE CACIMBA DE DENTRO E SOLÂNEA - PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual da Paraíba, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 01/12/2022.

BANCA EXAMINADORA



Prof^a. Bel. Karina dos Santos Fernandes de Souza (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof^a. Me. Lays Raianne Azevedo da Costa (Examinadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Bel. Diego de Paiva Bezerra
Examinador Externo

Aos meus pais, por todo o esforço, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por toda a sabedoria, pela saúde, pela força e pelo cuidado e proteção nessa longa jornada.

Aos meus pais, Luciano Silva e Ana Lúcia, que sempre me incentivaram a estudar, por todo o auxílio e dedicação, fazendo o possível e o impossível para que este momento se tornasse real.

A minha namorada, Amanda Almeida, pelo apoio, incentivo e compreensão em toda essa trajetória.

Aos meus amigos e aos colegas de curso que sempre me apoiaram durante toda a caminhada, em especial a família da Pilares Consultoria Júnior, que contribuiu de forma singular em minha formação.

Aos professores que proporcionaram o conhecimento necessário para meu crescimento profissional e humano, sobretudo à Prof. Karina Fernandes, por todo o suporte e empenho à elaboração deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação, agradeço.

RESUMO

As estruturas em concreto armado tornaram-se um marco do avanço tecnológico entre o século XIX e XX, possibilitando a construção de estruturas complexas e alcançando marcas extraordinárias para a engenharia. Dentre estas construções, destacam-se as pontes, cuja importância é notadamente relacionada com o direito fundamental de ir e vir, permitindo o deslocamento de veículos e pedestres em um trajeto antes impossibilitado por um corpo d'água. Todavia, a garantia desse direito entra em risco a partir do momento em que não há o devido cuidado com estas estruturas, oferecendo risco aos usuários. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo realizar a análise das principais manifestações patológicas que uma ponte localizada no agreste paraibano está sujeita, identificar as causas e origens relacionadas aos fenômenos observados, além de propor intervenções para solucionar tais problemas. O estudo foi realizado, primeiramente, através de vistorias no local, com inspeção visual e registro fotográfico, além de exames complementares para verificar o grau de carbonatação e o nível de fissuração, como também aferir o cobrimento dos elementos e verificar a seção de armaduras expostas. Com os dados colhidos, foi realizado o mapeamento de danos para identificar os pontos críticos da estrutura. O estudo mostrou que eflorescências, corrosão das armaduras, trincas e fissuras e deslocamento, são os problemas mais recorrentes na edificação, com destaque para os elementos mais danificados, que apresentaram rompimento e perda de seção em armaduras, grandes áreas com deslocamento e alto nível de carbonatação. Então, devido ao nível de degradação em diversos elementos da estrutura, foi possível concluir que, se não realizadas intervenções, haverá risco à segurança dos usuários e à durabilidade da estrutura, que tende a ser reduzida drasticamente com a evolução dos casos.

Palavras-chave: patologia. pontes. conservação.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures became a milestone of technological advancement between the 19th and 20th centuries, enabling the construction of complex structures and reaching extraordinary milestones for engineering. Among these constructions, bridges stand out, whose importance is notably related to the fundamental right to come and go, allowing the displacement of vehicles and pedestrians in a path previously impossible by a body of water. However, the guarantee of this right is at risk from the moment that there is no proper care with these structures, offering risk to users. In this sense, this work aims to carry out the analysis of the main pathological manifestations to which a bridge located in the wild of Paraíba is subject, to identify the causes and origins related to the observed phenomena, in addition to proposing interventions to solve such problems. The study was carried out, firstly, through on-site surveys, with visual inspection and photographic records, in addition to complementary tests to verify the degree of carbonation and the level of cracking, as well as to assess the covering of the elements and verify the exposed reinforcement section. With the collected data, damage mapping was carried out to identify the critical points of the structure. The study showed that efflorescence, reinforcement corrosion, cracks and fissures and spalling are the most recurrent problems in the building, with emphasis on the most damaged elements, which showed rupture and loss of section in frames, large areas with spalling and a high level of carbonation. So, due to the level of degradation in several elements of the structure, it was possible to conclude that, if interventions are not carried out, there will be a risk to the safety of users and the durability of the structure, which tends to be drastically reduced with the evolution of cases.

Keywords: pathology. bridges. conservation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte romana de Alcântara	17
Figura 2 – Esquema de composição de pontes	18
Figura 3 – Comparativo entre desempenho de uma estrutura sujeita a diferentes graus de patologia	21
Figura 4 – Fissuração por flexão por momento negativo e positivo, respectivamente	24
Figura 5 – Fissuração por esmagamento sem e com confinamento e por tração, respectivamente	24
Figura 6 – Erosão causada por abrasão superficial	25
Figura 7 – Concreto sujeito ao ataque por sulfatos	26
Figura 8 – Eflorescência no concreto gerada pelo fenômeno de lixiviação	27
Figura 9 – Tipos de corrosão em armaduras	28
Figura 10 – Processo de carbonatação do concreto	29
Figura 11 – Processo de corrosão do aço por reações anódicas	30
Figura 12 – Vegetação crescendo no interior de uma estrutura	31
Figura 13 – Procedimento metodológico	33
Figura 14 – Classificação da pesquisa	34
Figura 15 – Mapa de Cacimba de Dentro	35
Figura 16 – Mapa de Solânea	36
Figura 17 – Localização do objeto de estudo	37
Figura 18 – Vista da ponte	38
Figura 19 – Detalhamento das partes constituintes da ponte	39
Figura 20 – Acesso para inspeção visual	39
Figura 21 – Limpeza e aspersão de fenolftaleína para detectar carbonatação no concreto ..	41
Figura 22 – Coloração da Fenolftaleína em diferentes faixas de pH	41
Figura 23 – Aferição do cobrimento em um pilar	42
Figura 24 – Aferição de fissuras em um pilar	42
Figura 25 – Verificação da seção de uma armadura de pilar	43
Figura 26 – Representação estrutural da ponte	44
Figura 27 – Fundações dos pilares P7, P8, P9 e P10	45
Figura 28 – Sapata apoiada sobre rocha sã	46
Figura 29 – Fundação do pilar P9	47
Figura 30 – Fundações dos pilares P7, P8 e P10, respectivamente	47

Figura 31 – Início de corrosão na sapata do pilar P7	48
Figura 32 – Durante e após o ensaio com fenolftaleína na sapata do pilar P7	48
Figura 33 – Manifestações patológicas no pilar P1	50
Figura 34 – Armadura principal sem aderência ao concreto	51
Figura 35 – Manifestações patológicas no pilar P3	52
Figura 36 – Manifestações patológicas no pilar P5	52
Figura 37 – Representação geométrica da seção dos pilares	53
Figura 38 – Medição de cobrimento mínimo e máximo, respectivamente, no pilar P1	54
Figura 39 – Degradação dos estribos sujeitos a cobrimento inferior ao mínimo no pilar P5	54
Figura 40 – Manchas de eflorescência e de oxidação em vigas transversais	55
Figura 41 – Longarina entre o pilar P1 e P3	56
Figura 42 – Longarina entre o pilar P2 e P4	57
Figura 43 – Manifestações patológicas em parte do tabuleiro	58
Figura 44 – Guarda-corpo deteriorado	59
Figura 45 – Pontos críticos da estrutura	61
Figura 46 – Recuperação de elementos estruturais	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental (Tabela 6.1)	22
Quadro 2 - Cobrimento nominal em relação a classe de agressividade (Tabela 7.2)	22
Quadro 3 - Abertura máxima em função da classe de agressividade	24
Quadro 4 - Profundidade de carbonatação em função do tempo	29
Quadro 5 - Diâmetro das armaduras expostas do pilar P1	49
Quadro 6 - Manifestações patológicas observadas em cada elemento estrutural	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Geral	15
2.2	Específico	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Estruturas de concreto armado	16
3.1.1	<i>Pontes de concreto armado</i>	17
3.2	Desempenho das edificações	18
3.3	Vida útil e durabilidade	19
3.4	Manifestações patológicas	21
3.5	Causa e origem das manifestações patológicas	23
3.5.1	<i>Manifestações por agentes mecânicos</i>	23
3.5.1.1	<i>Solicitações</i>	23
3.5.1.2	<i>Erosão</i>	25
3.5.1.3	<i>Impactos e sismos</i>	25
3.5.1.4	<i>Incêndios</i>	26
3.5.2	<i>Manifestações patológicas por agentes químicos</i>	26
3.5.2.1	<i>Ataques de sulfatos</i>	26
3.5.2.2	<i>Lixiviação</i>	27
3.5.2.3	<i>Corrosão</i>	27
3.5.2.3.1	Carbonatação	29
3.5.2.3.2	Ataque de Cloretos	30
3.5.3	<i>Biodegradação</i>	30
3.5	Principais patologias em pontes de concreto armado	31
4	METODOLOGIA	33
4.1	Classificação da pesquisa	34
4.2	Caracterização da área de estudo	35
4.2.1	<i>Cacimba de Dentro</i>	35
4.2.2	<i>Solânea</i>	36
4.3	Caracterização da estrutura	37
4.4	Vistoria do local	39
4.4.1	<i>Inspeção visual</i>	39

4.4.2	<i>Registro fotográfico</i>	40
4.5	Exames complementares	40
4.5.1	<i>Medição de carbonatação</i>	40
4.5.2	<i>Aferição do cobrimento</i>	41
4.5.3	<i>Aferição do nível de fissuração</i>	42
4.5.4	<i>Verificação da seção de armaduras expostas</i>	43
4.6	Mapeamento de danos	43
4.7	Diagnóstico e prognóstico	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	Manifestações observadas	45
5.1.1	<i>Fundações</i>	45
5.1.2	<i>Pilares</i>	49
5.1.3	<i>Vigas transversais entre pilares e entre longarinas</i>	55
5.1.4	<i>Longarinas</i>	56
5.1.5	<i>Tabuleiro</i>	57
5.1.6	<i>Guarda-corpo</i>	58
5.2	Mapeamento de danos	59
5.3	Causas e soluções	61
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Diante de um contexto em que tecnologias construtivas são constantemente desenvolvidas, o concreto, mesmo sendo um material relativamente antigo, se destaca por sua versatilidade, possibilitando uma gama de utilizações em estruturas cada vez mais desafiadoras. Por sua vez, essa variedade só se fez possível com a incorporação do aço, que trouxe novas perspectivas para seus pontos negativos, principalmente no que diz respeito à resistência à tração.

Segundo Bastos (2019), o concreto, através de proporções corretas entre seus componentes, procura atender as propriedades mecânicas e físicas simultaneamente, buscando também a trabalhabilidade ideal para que se possa ter facilidade no transporte, lançamento e adensamento durante a execução. Já Morais *et al.* (2020) cita que as estruturas em concreto armado foram criadas para aliar a resistência à compressão e durabilidade da pedra, com a resistência mecânica do aço, de tal forma que haja a proteção da armadura contra a corrosão.

Desde a concepção de sistema estruturais baseados na utilização do concreto e aço, ficou constatada sua notória eficácia, mas somente a partir da década de 60 observou-se a otimização nas estruturas em concreto através de traços mais eficientes, utilizando menores teores de cimento e com maiores resistências, além da utilização de adições e aditivos, reduzindo substancialmente as seções necessárias nas peças de concreto armado (MAIA, 2009). Todavia, essa redução trouxe aspectos negativos quanto à durabilidade do material.

Anteriormente era admitido que não se fazia necessário ter grandes cuidados de manutenção nessas estruturas, pois era de conhecimento que o concreto não sofria diante das intempéries. Tal afirmativa era condizente com a realidade da época, uma vez que as construções antigas eram projetadas de acordo com a experiência e o bom senso dos profissionais, aumentando consideravelmente a seção de peças estruturais, assim como sua massa e inércia (MEDEIROS *et al.* 2011). Contudo, o desenvolvimento do material e a diminuição das dimensões necessárias o tornou mais suscetível aos agentes patológicos, afetando também o aço em seu interior.

Outro ponto a ser considerado é que, por conta de falhas nos processos de execução e até mesmo no próprio projeto, muitas estruturas podem apresentar maior deterioração. Nesse contexto, diversos aspectos podem ser levados em conta, incluindo, por exemplo, a capacidade da mão-de-obra, tanto pelos colaboradores quanto pelos encarregados e engenheiros responsáveis, o uso equivocado de materiais e dosagens, o emprego de técnicas construtivas ineficazes e desconformidades com o projeto, principalmente no que diz respeito ao cobrimento

das armaduras, adensamento e permeabilidade do concreto, que são fatores primordiais relacionados à durabilidade (AGUIAR, 2006).

Diante disso, também surge a preocupação quanto ao desempenho, levando em conta que, quando se trata de durabilidade, à medida que o elemento é submetido ao desgaste e adquire certas patologias, a sua eficiência técnica também será afetada. Durante toda a vida útil da estrutura é importante que as condições de desempenho estejam presentes, garantido a segurança com requisitos de estabilidade e resistência e critérios como os estados-limites de serviço e estados-limites últimos. Como diretriz nesse aspecto, é possível admitir a Norma Brasileira: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais (ABNT NBR 15575-2), que pode ser admitida em diversos cenários para guiar as condições de segurança estrutural e durabilidade através das normas de referência e complementares, assegurando que se seguidas corretamente tais condições estarão atendidas, com seu desempenho comprovado ao longo do tempo (BRITZ, 2018).

Tais questões convergem para um ponto específico, que é a manifestação patológica. De acordo com Ferreira (2018), em estruturas de concreto armado, essas manifestações afetam tanto a qualidade da construção quanto sua vida útil, a partir da redução da resistência à ruptura e da capacidade de suportar agentes externos. Sem os cuidados necessários, podem surgir diversos problemas, tais como trincas e fissuras, eflorescência, degradação e corrosão das armaduras, que afetam a longo prazo no desempenho, durabilidade e resistência de elementos estruturais.

Além disso, Santos¹ (2014) cita que a falta ou inadequação na manutenção podem ocasionar problemas derivados de manifestações patológicas, que surgem de uma sequência de erros e desencadeiam diversos problemas e riscos, tendo como origem o desconhecimento técnico, a improficiência e problemas econômicos (apud MORAIS 2020).

Então, relacionadas a essa problemática, diversas questões são levantadas, incluindo a ameaça ao direito fundamental de ir e vir, uma vez que a infraestrutura rodoviária brasileira é constituída de inúmeras pontes, já que, por conta da topografia e hidrografia local, contam com diversos vales e cursos d'água no trajeto de estradas e rodovias. A malha rodoviária brasileira representa valores inestimáveis, devido a sua contribuição para o desenvolvimento socioeconômico (VITÓRIO, 2015).

Logo, as pontes, concebidas para suportar as ações de tráfego de veículos de dimensões variáveis, se tratam de edificações primordiais e estão entre os elementos estruturais de concreto

¹ Santos, G. V. D. (2014). Patologias devido ao recalque diferencial em fundações. Centro Universitário de Brasília – UniCEUB Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas–FATECS, Brasília.

armado de fundamental importância, merecendo atenção especial quanto a seu estado de conservação nos níveis de infra, meso e superestrutura.

No entanto, devido ao ambiente que estão inseridas, as pontes são suscetíveis a diversas patologias, mas não o bastante, agravadas por erros de execução, problemas de manutenção e, frequentemente, descaso por parte dos órgãos responsáveis. Segundo Vitorio (2006), culturalmente estes órgãos - nos níveis federal, estadual e municipal - priorizam a execução da obra, sem grandes preocupações quanto à conservação e manutenção, em especial a preventiva. Tal afirmativa pode ser vista claramente em Obras de Arte Especiais, como pontes e viadutos, e como resultado da falta de políticas voltadas à conservação, há um risco elevado de consequências graves para os usuários.

Portanto, é fundamental implementar um mecanismo de reparação para resolver a situação, uma vez que as manifestações patológicas, têm um comportamento que majoritariamente evolui ao longo do tempo e podem levar a problemas adicionais mais difíceis de corrigir. Nesse contexto, visto a importância ao qual elementos estruturais representam no iminente risco de vida aos usuários, o estudo de patologias surge, por meio de inspeções e análises técnicas, para avaliar o grau e risco e solucionar de forma eficiente a problemática encontrada (MORAIS, 2017).

Face as considerações citadas, esse trabalho se justifica pela necessidade de avaliar o estado e as condições aos quais os elementos estruturais em concreto armado de uma ponte situada na PB-111 estão submetidos, analisando de forma técnica os problemas incidentes e propondo soluções cabíveis para tais anomalias, visto sua importância por ser a principal via de acesso no deslocamento entre Cacimba de Dentro e os principais centros urbanos da Paraíba

2 OBJETIVO

2.1 Geral

O presente trabalho tem como o objetivo realizar um levantamento das manifestações patológicas que ocorrem em uma ponte de concreto armado, situada entre os municípios de Cacimba de Dentro e Solânea, no estado da Paraíba.

2.2 Específico

- Investigar as principais patologias existentes nos elementos estruturais da ponte e avaliá-las de forma quali-quantitativa;
- Avaliar o grau de carbonatação e de corrosão do concreto e das armaduras;
- Classificar trincas e fissuras;
- Mapear e diagnosticar os pontos críticos e as causas mais frequentes de deterioração;
- Descrever as possíveis causas e propor soluções viáveis para os problemas observados;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Estruturas de concreto armado

Desde os primórdios da civilização, as construções humanas evidenciam a importância de materiais como pedra e tijolos. A exemplo, destaca-se a utilização desse tipo de material na arquitetura greco-romana, aos quais empregaram blocos, vigas e placas de pedra em construções históricas, como templos, palácios etc. Todavia, algumas características marcaram essa arquitetura, como o luxo, a grandiosidade, a robustez e, principalmente, o uso de arcos e abóbadas, que trazem à tona o maior ponto fraco do tipo de material empregado: a sua baixa resistência à tração. Isto é, o emprego de construções com arcos se deu por conta da deficiência em vencer vãos maiores que os usuais com elementos estruturais planos, semelhantemente às vigas e lajes, pois a solicitação a tração fazia com que estas peças falhassem. Contudo, ao utilizar o sistema de arcos todas as peças são solicitadas à compressão, solucionando assim o problema mecânico e dando ênfase a sua melhor propriedade: a resistência à compressão (EL DEBS & TAKEYA, 2007).

Embora a ideia do concreto seja datada há milênios - inclusive no próprio império romano - foi após o surgimento do cimento Portland, em 1824, que o grau tecnológico que conhecemos hoje tomou forma. O francês Joseph Louis Lambot, 25 anos depois, em 1849, utilizando argamassa e barras de aço, construiu um barco, sendo atribuído a essa obra como o surgimento do conceito de concreto armado. Ainda, de acordo com Fusco (2008), o concreto armado, deu-se principalmente ao advento da revolução industrial, com o surgimento do aço laminado e do cimento Portland, com a atribuição da invenção não sendo a apenas uma pessoa, mas a diversos pioneiros, como os franceses Monier e Coignet e o norte-americano Hyatt, além do próprio Lambot.

Bastos (2019), cita que as qualidades de baixo custo, durabilidade e alta resistência do concreto, aliadas à ductilidade e resistência à tração do aço, permitem a construção de elementos de variáveis formas e tamanhos, atendendo a diversos tipos de obra com exímio. Dessa forma, o concreto armado representa um marco na história das construções e dos materiais. A união em proporções ideais de dois materiais com propriedades mecânicas distintas, proporcionando resistência, durabilidade e segurança, dentre outros aspectos, tornou o concreto armado uma das soluções construtivas mais empregadas no mundo e a mais empregada no Brasil.

Por ser um material versátil, o concreto armado passou a ser utilizado em praticamente todos os tipos de estruturas, desde as mais simples até as mais complexas, como, por exemplo,

em arranha-céus, barragens e principalmente em obras de arte especiais, como pontes e viadutos, que antes do advento do concreto armado, eram construídas inteiramente em aço, madeira ou com sistemas de blocos em arcos (EL DEBS & TAKEYA, 2007).

3.1.1 Pontes de concreto armado

As pontes são estruturas com função principal de estabelecer conexão entre diferentes porções de terra, facilitando o deslocamento de veículos e pedestres, permitindo o cruzamento de estradas e rodovias por rios, lagos e, em alguns casos, do mar. O emprego deste tipo de construção se deu principalmente pela necessidade de expansão comercial e territorial dos povos antigos, tendo como destaque o império romano, cuja dominância no sistema construtivo de estradas, juntamente com o expansionismo imperialista, levaram ao desenvolvimento de pontes robustas e avançadas para a época (VALERIANO, 2021).

Fundamentalmente, os sistemas estruturais utilizados na construção de pontes eram os biapoiados, em balanço, em arco e pênsil (VALERIANO, 2021). Contudo, se tratando de eficiência mecânica, destaca-se o sistema em arcos, que conseguia suportar grandes cargas com vão maiores que os usuais, já que, devido às limitações tecnológicas dos materiais e métodos construtivos da época, tais construções eram feitas inteiramente em blocos de pedra ou tijolos, como visto na Figura 1, em uma ponte construída pelo império romano.

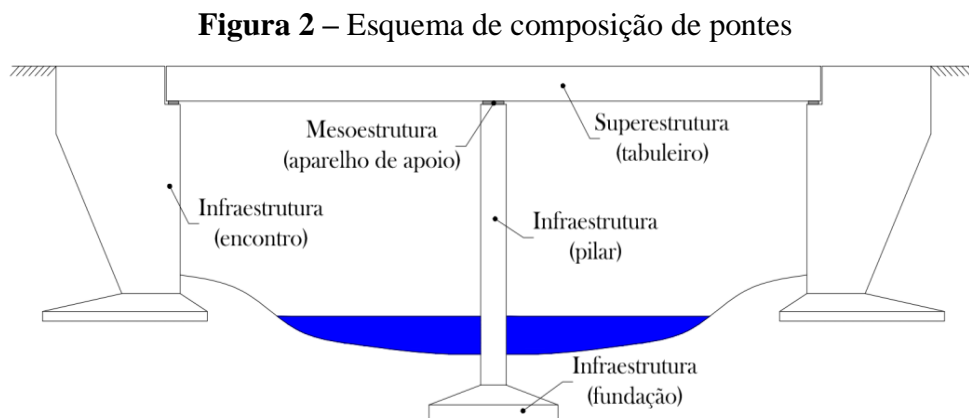
Figura 1 – Ponte romana de Alcântara



Fonte: spain.info (2013)

Contudo, de acordo com Valeriano (2021), foi com o concreto armado que ocorreu a evolução no sistema construtivo de pontes. Em 1875, após anos de experiência com o emprego de armadura no concreto na construção de vasos e canalização, Monier desenvolveu a primeira estrutura de ponte em concreto armado, a ponte de Chazelet, com 14 metros de extensão. Desde então, o conhecimento científico e tecnológico foi aperfeiçoado, com o emprego de diferentes técnicas e estruturas com maior confiabilidade, expandindo o uso desse material.

Hoje, a composição destas estruturas é feita em três partes principais: infra, meso e superestrutura, conforme visto na Figura 2. Segundo Cavalcante (2019), a infraestrutura é constituída pela fundação, responsável por transmitir todos os esforços provenientes para o terreno, caracterizada pelas sapatas, tubulões, blocos superficiais e blocos estaqueados. A mesoestrutura é composta pelos elementos de ligação entre a superestrutura e as estruturas de suporte (pilares, encontros e elementos de fundação). Já a superestrutura é o elemento que suporta o tráfego, composta por estruturas primárias (vigas) e secundárias (lajes ou tabuleiros). Tais elementos podem ser vistos no esquema mostrado na Figura 2.



Fonte: Cavalcante (2019)

Todavia, não basta apenas que a ponte transponha obstáculos, é necessário também que sejam cumpridos alguns requisitos fundamentais para que tenha verdadeira eficácia. Marchetti (2018) cita cinco pontos que devem ser atendidos: funcionalidade, segurança, economia, durabilidade e estética. A construção de uma ponte deve garantir que sejam atendidas as exigências de tráfego, promover estabilidade global quanto aos esforços que serão solicitados, apresentar aspecto harmônico com o meio em que está inserida, ser economicamente viável e, principalmente, atender todos esses fatores no horizonte de tempo previsto.

3.2 Desempenho das edificações

Embora o desenvolvimento de materiais e técnicas construtivas estejam em evolução há séculos, é importante ressaltar que, para que fosse possível acompanhar o crescimento tecnológico pós-revolução industrial, foi necessário correr alguns riscos, ainda que dentro de certos limites. Souza e Ripper (2009) explicam que, com o alto crescimento da construção civil, em certa época houve a aceitação tácita de riscos causada pela necessidade de inovações, em um contexto em que o desenvolvimento tecnológico dependia do estudo e análise dos erros envolvidos, resultantes da degradação precoce ou até mesmo acidentes.

Diante disso, se fez necessário a adoção do conceito de desempenho de uma estrutura. Este conceito envolve outros temas como vida útil e durabilidade, garantindo a segurança, servicibilidade e estética. Para Souza e Ripper (2009), o desempenho é entendido como o comportamento em serviço ao longo de toda a vida útil da estrutura, sendo resultado das três etapas construtivas: projeto, construção e manutenção. Ou seja, para que o desempenho de uma estrutura seja satisfatório, deve ser compreendido que ela apresente as propriedades mínimas necessárias para garantir sua utilização de forma segura, mesmo estando exposta a agentes agressivos, ao qual deveria ter sido projetada para suportar, construída de forma correta e submetida a manutenções periódicas.

No Brasil, os primeiros estudos para normatização do desempenho de edificações são datados no ano de 2000, através da Caixa Econômica Federal e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), para adequar padrões às construções de habitações. Em 2007 foi lançada a primeira versão da ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho, com a versão mais recente sendo datada em 2013 (CAU, 2016). Contudo, por mais que a norma seja de interesse habitacional, ela reúne diversos pontos que possuem serventia para outros tipos de edificações.

Quanto ao desempenho estrutural, a NBR 15575-2 (ABNT, 2013), que trata sobre os requisitos para os sistemas estruturais, traz dois conceitos intrínsecos às exigências de segurança e utilização: os estados limites último (ELU) e os estados limites de serviço (ELS). O ELU está relacionado com a interrupção da utilização da edificação, seja por ruína parcial ou completa, deformação excessiva ou perda de estabilidade. Já o ELS implica no comprometimento da construção por degradação que possa fragilizar a durabilidade da estrutura, deformações acima do limite previsto e qualquer outra falha que acometa na diminuição da vida útil ou interfira no bem-estar dos usuários (CBIC, 2013).

3.3 Vida útil e durabilidade

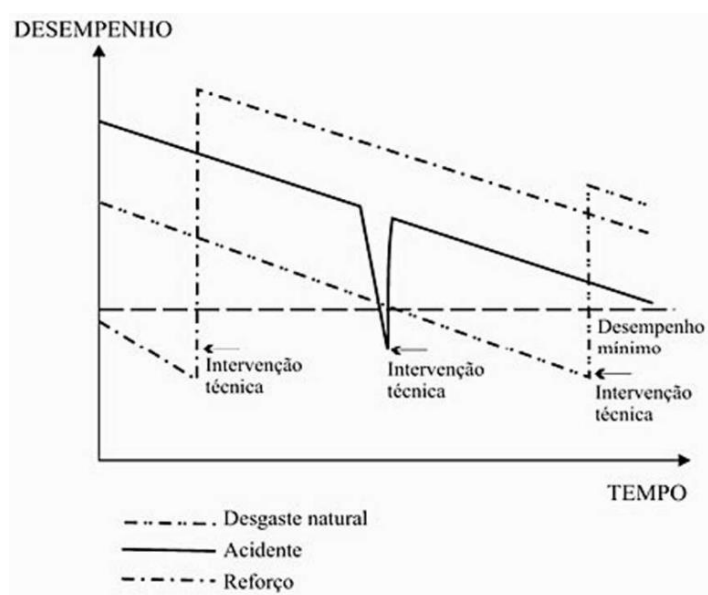
A vida útil e a durabilidade são conceitos intrínsecos entre si, muito embora possam ser considerados dois tipos de vida útil: a total e a de projeto (VUP). De acordo com Araújo (2014), a vida útil total é o período entre a construção e a ruptura parcial ou total da estrutura. Porém, a utilização deste termo, além de ser muito abrangente, é condicionado por variáveis que não permitem a avaliação lógica de cada situação, como, por exemplo, em casos de sismos ou acidentes que causam o desabamento da edificação precocemente. Cabe então a utilização da VUP como principal parâmetro para a realização de projetos.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) traz o conceito de vida útil de projeto como o período durante o qual as características das estruturas continuam a existir, desde que satisfaçam os requisitos de uso e manutenção especificados pelo autor do projeto e pelo construtor. Bolina *et al* (2019) complementa que a vida útil de projeto deve ser definida desde a concepção da edificação, mesmo que inicialmente seja um valor teórico. Todos os envolvidos, seja projetista, construtor ou fornecedor, devem entregar um bem durável, atendendo pelo menos os níveis mínimos exigidos em projeto. Além disso, o próprio usuário tem contribuição na vida útil da edificação, tendo como responsabilidade prezar pela boa utilização, para que seja garantida a funcionalidade da obra.

Por durabilidade, pode-se entender como a condição de tempo em que o material, após a caracterização do nível de degradação, irá resistir, mediante o grau de agressividade, com a conservação das suas propriedades (SOUZA & RIPPER, 2009). No entanto, alguns fatores influenciam na durabilidade, tais como: relação água/cimento, classe de agressividade ambiental, cobrimento das armaduras, consumo mínimo de cimento e execução e manutenção da estrutura (ZEQUIM, 2017). Garantindo cada um destes aspectos, a durabilidade da estrutura então, deve atender ao requisito mínimo de acordo com a VUP especificada em norma.

Entretanto, é indispensável a utilização de intervenções técnicas para garantir que a durabilidade e – consequentemente – a vida útil sejam garantidas ou até mesmo aumentadas. A Figura 3 apresenta três comparativos entre desempenhos em função do tempo, ou seja, em relação a vida útil. Em todos os casos, quando o desempenho mínimo é atingido, ocorre a intervenção, sendo observado que estruturas projetadas e executadas de maneira correta, estando sujeitas a desgaste natural, apresentam maior constância de desempenho, necessitando de intervenções após muito tempo decorrido, diferentemente de estruturas com erros de projeto ou execução, ou sujeitas a acidentes, cujo desempenho mínimo é rapidamente atingido (SOUZA & RIPPER, 2009).

Figura 3 – Comparativo entre desempenho de uma estrutura sujeita a diferentes graus de patologia



Fonte: Souza e Ripper (2009)

Portanto, fica evidente que a durabilidade, a vida útil e o desempenho são correlacionados, ou seja, a durabilidade dita o tempo de vida útil que, conseqüentemente, acaba por identificar o nível de desempenho da estrutura.

3.4 Manifestações patológicas

O conceito de patologia, na etimologia, é proveniente do grego *páthos*, que significa doença, e *logos*, cujo significado é estudo. O termo é utilizado principalmente na ciência médica para fazer referência a alterações morfológicas e fisiológicas na saúde. Contudo, a engenharia investigativa também passou a utilizá-lo para abordar os problemas sofridos em estruturas. Segundo Souza e Ripper (2009), a patologia das construções é responsável pelo estudo científico das origens, formas e conseqüências relacionadas às manifestações, além da ocorrência de falhas e degradação das estruturas.

Embora o concreto tenha sido considerado por muito tempo como um material extremamente resistente e durável, hoje é de conhecimento que o concreto sofre com ataques físicos e químicos de diferentes formas. De acordo com Bolina *et al.* (2019), com a massiva utilização em ambientes e solicitações diferentes, a composição do concreto armado revelou problemas típicos desse tipo de material, ocasionando necessidade de manutenção ou reparo nas peças estruturais.

De posse do acervo baseado em décadas de utilização do concreto armado, hoje temos meios de quantificar, por exemplo, as classes de agressividade ambiental, que servem como parâmetro para dimensionamento de estruturas através do risco de deterioração, exigindo maior espessura de cobrimento nos elementos, conforme o grau de agressividade, de acordo com as tabelas 6.1 (Quadro 1) e 7.2 (Quadro 2) dispostas na NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014).

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental (Tabela 6.1)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Quadro 2 – Cobrimento nominal em relação a classe de agressividade (Tabela 7.2)

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118 (2014)

O obediência a estas diretrizes traz, dentre outros aspectos, maior segurança quanto a durabilidade de estruturas. A exemplo, ciclos alternados de umidificação e secagem, juntamente com poluentes ambientais, como o carbono, são extremamente nocivos às estruturas, como pontes e viadutos. O resultado destes ciclos são principalmente a degradação do concreto por carbonatação e a corrosão de armaduras, além de trincas e fissuras. Então, para retardar esses efeitos, as recomendações normativas são fundamentais. Garantindo o cobrimento nominal correto e a boa qualidade do concreto, a penetração destes agentes, por mais agressivos que sejam, não conseguem atingir as armaduras facilmente, preservando a estrutura por mais tempo (FUSCO, 2008).

3.5 Causa e origem das manifestações patológicas

A deterioração de estruturas de concreto armado é consequência de uma série de fatores e ações que contribuem para o surgimento de manifestações patológicas. Assim como uma ferida não tratada pode ocasionar infecção e agravamento do caso, o grau de porosidade e a presença de trincas e fissuras no concreto também tem participação direta em problemas mais graves. Dessa forma, Souza e Ripper (2009) trazem uma perspectiva onde, em sua maioria, o ataque nas estruturas é consequência primária do transporte de substâncias agressivas através de interstícios no concreto.

Todavia, três principais grupos são relacionados no que tange a agressão nestes elementos: os agentes mecânicos, químicos e biológicos. O resultado desses ataques é caracterizado em manifestações patológicas comuns, são elas: trincas, fissuras, eflorescência, manchas, carbonatação, corrosão da armadura e segregação do concreto. Os problemas patológicos descritos são dados como simples, onde não é necessário especialistas para analisar os casos. Porém, existem também problemas patológicos complexos, que exigem métodos de inspeção profundos e conhecimentos altamente especializados (SOUZA & RIPPER, 2009).

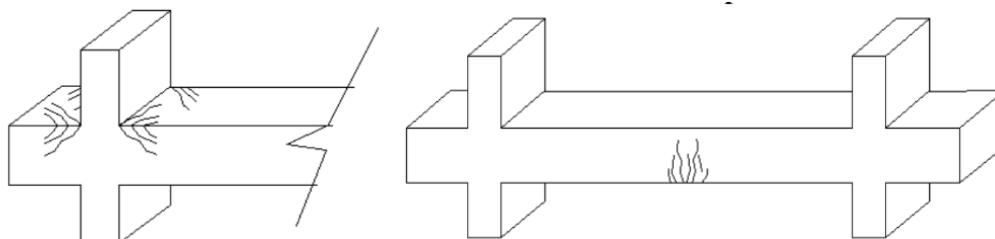
3.5.1 Manifestações por agentes mecânicos

3.5.1.1 Solicitações

Os esforços de compressão, tração e torção são intrínsecos a uma estrutura, contudo, em situações específicas, estes esforços, principalmente quando não considerados em projeto, acarretam o surgimento de trincas e fissuras por todo o corpo da peça solicitada. Souza e Ripper (2009) citam que a má utilização, tal como a exposição a sobrecargas, também agrava o aparecimento de problemas estruturais.

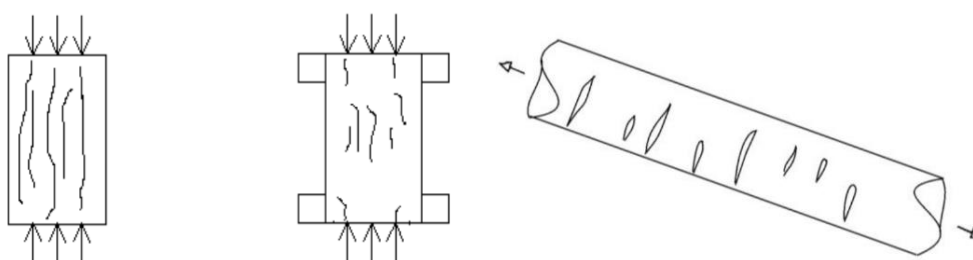
As fissuras podem ocorrer na vertical, horizontal e na diagonal, então, devido às diferenças mecânicas, as características de fissuração também seguem o padrão de cada tipo de esforço. As figuras abaixo demonstram as especificidades entre alguns tipos de reação mais comuns e de fácil identificação.

Figura 4 – Fissuração por flexão por momento negativo e positivo, respectivamente



Fonte: MASCARENHAS et al (2019)

Figura 5 – Fissuração por esmagamento sem e com confinamento e por tração, respectivamente



Fonte: MASCARENHAS et al (2019)

Vale destacar que há diferenciação entre os termos trinca e fissura. De acordo com a NBR 8802 (ABNT 2019) as fissuras são caracterizadas por aberturas de até 0,5mm, ocasionadas por ações mecânicas ou físico-químicas. Portanto, acima desse valor, a terminologia adotada é de trinca. Existem ainda as fissuras ativas e passivas, ao qual, nas ativas ocorrem variações ao passar do tempo, evoluindo para o quadro para trincas, enquanto nas passivas o estado não se modifica, permanecendo inerte.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), fissuras de 0,2mm a 0,4mm não possuem importância significativa quanto a evolução da corrosão de armaduras. No entanto, há a indicação de limites de aberturas em função da classe de agressividade, exemplificada no Quadro 3.

Quadro 3 – Abertura máxima em função da classe de agressividade

Classe de agressividade	Abertura máxima
I	0,4mm
II e III	0,3mm
IV	0,2mm

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Na prática estes limites podem ser eventualmente ultrapassados sem necessariamente representar um alerta de segurança, utilizando-os na maioria das vezes como critérios de projeto. Porém, a aceitação pelo usuário também deve ser levada em consideração, já que fissuras com aberturas consideráveis podem trazer desconforto psicológico (ABNT NBR 6118, 2014).

3.5.1.2 *Erosão*

A erosão é caracterizada pelo desgaste superficial causado por agentes externos, podendo ser dividida em dois fatores condicionantes: a abrasão e a cavitação. A abrasão diz respeito ao desgaste acarretado pelo atrito entre sólidos (pneus, peças metálicas, troncos de árvores, etc.) e o material. Já a cavitação é ocasionada pelas bolhas de ar na água que, devido à pressão líquida, implodem e lentamente degradam a superfície em contato (FUSCO, 2008). A Figura 6 demonstra este tipo de problema, onde, por resultado da abrasão superficial decorrente do tráfego de veículos, houve o desgaste do concreto.

Figura 6 – Erosão causada por abrasão superficial



Fonte: wordpress.com (2017)

A diferença visual entre a erosão por abrasão e por cavitação é facilmente perceptível. De acordo com Souza e Ripper (2009), a superfície atingida por cavitação é irregular, riscada e com muitas cavidades, enquanto a ação abrasiva deixa o concreto com aspecto liso. Dessa forma, se torna característico os dois tipos de erosão.

3.5.1.3 *Impactos e sismos*

As ações causadas por sismos e choques de veículos ou embarcações em elementos estruturais são responsáveis por danificar fisicamente o concreto, condicionando o mesmo a uma maior vulnerabilidade quanto a ataques químicos, por exemplo. Embora possam ser – de certa forma - quantificáveis, o grau de degradação pode ser diferente em vários cenários, desde apenas leves desgastes, até a perda parcial ou total da função estrutural do elemento (SOUZA & RIPPER, 2009).

3.5.1.4 Incêndios

Os impactos que mudanças de temperatura causadas por incêndios tem sobre a estrutura de edificações é enorme, já que ocorrem expansões térmicas localizadas. O calor gerado durante a fase mais crítica, denominada flash-over, é absorvido pelo concreto, diminuindo sua resistência, uma vez que o aço e o concreto possuem coeficientes de dilatação ligeiramente diferentes, desagregando o concreto e expondo as armaduras através de pressões internas geradas (SOUZA & RIPPER, 2009)

3.5.2 Manifestações patológicas por agentes químicos

3.5.2.1 Ataques de sulfatos

Segundo Mascarenhas *et al.* (2019), os sulfatos, presentes no solo, na água e no concreto, reagem com a pasta de cimento hidratada, causando sua desintegração através de ações expansivas. Dessa forma, nas zonas atingidas, o concreto perde resistência, tornando-se um material friável. A Figura 7 demonstra a ação do ataque de sulfatos, com a formação de taumasita em um elemento de concreto.

Figura 7 – Concreto sujeito ao ataque por sulfatos



Fonte: ufc.br (2001)

Fusco (2008) cita que o ataque por sulfatos atinge apenas o aluminato tricálcico (C3A) presente na composição do cimento que, por reação química com a pasta hidratada, gera cristais expansíveis, destruindo a estrutura interna do concreto. Os principais sulfatos são os de magnésio, cálcio, potássio, sódio e amônio.

3.5.2.2 Lixiviação

A lixiviação é a dissolução e aglomeração dos compostos de cimento hidratado na presença de água. Uma de suas principais características é a geração de uma eflorescência na superfície do concreto, causada pelo carreamento do hidróxido de cálcio com o gás carbônico. (ARAÚJO, 2014). De acordo com Fusco (2008), como ocorre perda de material por meio da percolação de água, há o aumento da porosidade e, por consequência, uma redução no pH do concreto. Logo, esse tipo de manifestação patológica pode servir de ponte para facilitar a ocorrência de problemas distintos. Contudo, o autor cita que na ocorrência de saturação da peça, o risco de corrosão é desconsiderado.

Figura 8 – Eflorescência no concreto gerada pelo fenômeno de lixiviação



Fonte: Mapa da Obra (2017)

Além dos problemas físicos no concreto, a ocorrência de lixiviação resulta na aparição de manchas brancas no concreto, que sobretudo trazem prejuízos à estética da edificação (Figura 8). A depender do grau, este tipo de manifestação patológica pode causar desconforto para os usuários, se enquadrando no ELS, já que interfere no seu bem-estar, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014).

3.5.2.3 Corrosão

Dentro do concreto as armaduras são protegidas da corrosão por uma camada impermeável de óxido de ferro, resultante da reação do aço com a água alcalina existente nos poros. Essa camada é denominada película passivadora, onde a despassivação dessa camada resulta na corrosão da armadura. Todavia, existem três diferentes fatores que enfraquecem a proteção do aço causando corrosão: a carbonatação, a lixiviação e a presença de íons cloreto (FUSCO, 2008).

Figura 9 – Tipos de corrosão em armaduras



Fonte: wordpress.com (2017)

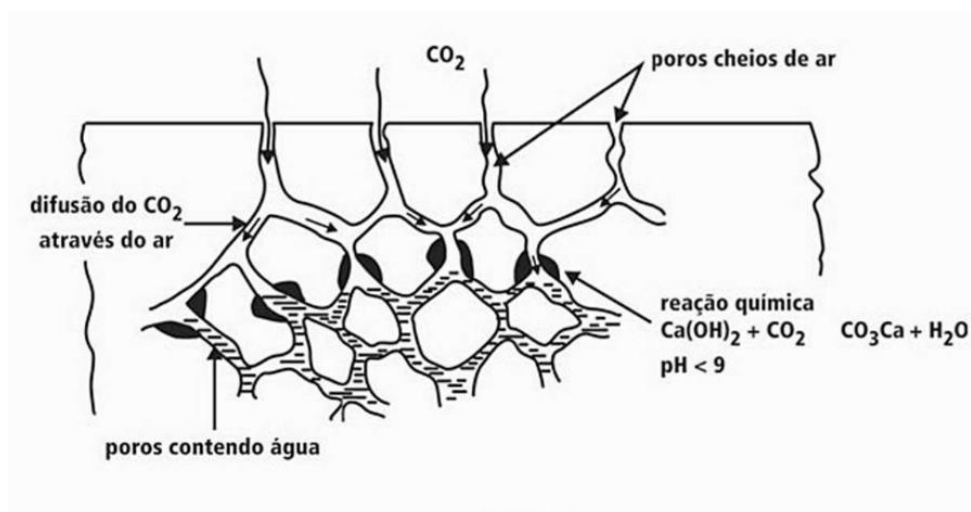
Existem dois tipos de corrosão: a generalizada e a localizada. A corrosão generalizada é a que se estende por toda a superfície metálica, com perda uniforme de espessura. Já a localizada é encontrada em pequenas áreas do metal, formando cavidades ligeiramente profundas, chamadas de pites. Além disso, quando o elemento fica sujeito a esforços mecânicos, podem surgir fissuras devido a perda das propriedades mecânicas, caracterizando a corrosão localizada sob tensão (OLIVEIRA, 2012).

3.5.2.3.1 Carbonatação

A carbonatação é caracterizada pela entrada de gás carbônico presente na atmosfera, na estrutura do concreto. Em contato com a pasta cimentícia, o carbono reage com o hidróxido de cálcio, gerando carbonato de cálcio (CaCO_3), resultando na diminuição do pH do concreto que é fortemente alcalino ($\text{pH} > 12,5$) para valores em torno de 9 (Figura 10) (SANTOS, 2014). Por se tratar de um processo contínuo, a penetração do CO_2 no concreto pode transpassar a camada de proteção das armaduras e destruir sua camada passivadora quando atingido um $\text{pH} < 9$, iniciando o processo de corrosão. Todavia, a velocidade desse processo depende da porosidade do concreto, da umidade do meio e da taxa de CO_2 na atmosfera. Portanto, em termos

comparativos, a velocidade de ataque será menor em zonas rurais e maior em grandes centros urbanos (ARAÚJO, 2014).

Figura 10 – Processo de carbonatação do concreto



Fonte: FUSCO (2008)

Contudo, Fusco (2008) cita que, em uma simulação com condições ambientais aproximadas, o tempo para o aumento da camada de carbonatação é progressivamente reduzido, uma vez que a formação de cálcio através das reações químicas reduz os poros, dificultando a entrada do CO_2 . O Quadro 4 traz a comparação cronológica da profundidade de carbonatação.

Quadro 4 – Profundidade de carbonatação em função do tempo

Profundidade de carbonatação em centímetros	Tempo em anos
1	5
1,5	20
2,0	50
2,5	100

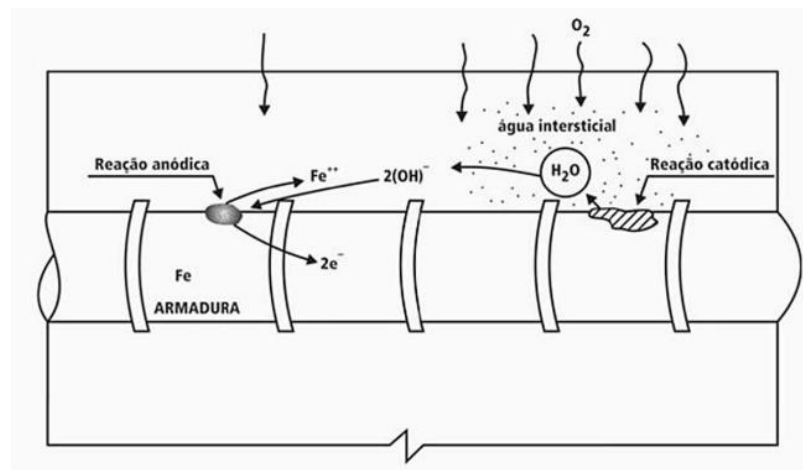
Fonte: FUSCO (2008)

Entretanto, por mais que haja redução na velocidade de penetração, a camada já fragilizada continua sendo porta de entrada para outros tipos de agentes patológicos, pois o processo de carbonatação também favorece o surgimento de microfissuras derivadas da modificação estrutural dos poros pela formação de subprodutos que alteram o seu volume (VALENÇA, 2016).

3.5.2.3.2 Ataque de Cloretos

O ataque por íons de cloreto está entre as principais causas de deterioração de estruturas. Estes íons de cloreto podem estar presentes no próprio concreto, seja na água, em agregados ou em aditivos utilizados, ou presentes no ambiente, como na água do mar ou em locais com poluentes ambientais. A reação ocorre com a entrada dos íons de cloreto na superfície do aço, já que eles possuem capacidade de dissolver a película passivadora, dando início a reações anódicas na armadura (FUSCO, 2008). Estes íons não são consumidos durante o processo, mas continuam enfraquecendo a camada que protege as armaduras e, dessa forma, acarreta na corrosão do aço de forma pontual e bastante agressiva, conforme exemplificado na Figura 11 (CRAUSS, 2010).

Figura 11 – Processo de corrosão do aço por reações anódicas



Fonte: FUSCO (2008)

A reação anódica (oxidação) ocorre quando o ferro fica carregado positivamente, liberando elétrons pela passagem dos íons ferrosos (Fe^{++}) e elétrons para a solução. Todavia, a reação só é possível com a presença de água e oxigênio que, na reação catódica, serve de eletrólito, resultando na formação de íons de hidroxila (OH^-). A migração de íons pelo eletrólito resulta na oxidação da zona anódica, com a combinação dos íons de hidroxila e dos íons ferrosos (CRAUSS, 2010).

3.5.3 Biodegradação

Não apenas aspectos físicos e químicos têm impacto sobre o concreto, mas ações biológicas podem influenciar diretamente na durabilidade. A presença de vegetação próximas às estruturas, por mais que pareçam inofensivas à primeira vista, podem acarretar a desagregação e deterioração do elemento por conta do crescimento de raízes pelos seus interstícios, expandindo e levando à degradação mecânica (Figura 12). Além disso, microorganismos podem gerar subprodutos agressivos ao concreto e organismos, como conchas, por exemplo, podem aumentar a massa da estrutura e alterar seu comportamento dinâmico, já que não há modificação da rigidez do elemento (SOUZA & RIPPER, 2009).

Figura 12 – Vegetação crescendo no interior de uma estrutura



Fonte: Portal R7 (2018)

Góis (2012), cita que normalmente os microrganismos mais prejudiciais aos materiais são criados em um ambiente com umidade e nutrientes ideais, formando um biofilme que os torna mais resistentes. Logo, estruturas sujeitas a umidade constante e com contato maior com a natureza, como pontes e viadutos, estão mais suscetíveis a este tipo de deterioração.

3.5 Principais patologias em pontes de concreto armado

Em séculos de utilização, a catalogação de manifestações patológicas em elementos de concreto armado mostrou que existem problemas característicos deste tipo de material. Muito embora para cada tipo de estrutura e utilização existam particularidades, é comum recorrências análogas de patologias em peças com funções totalmente distintas. Como exemplo, Souza e

Ripper (2009) citam que a fissuração é intrínseca a este tipo de material, sendo esta deficiência a mais fácil de reconhecer, principalmente em níveis acentuados de deformação.

No caso particular de pontes, por se tratar de edificações que recebem altíssimas cargas, vencem grandes vãos e que geralmente estão sujeitas a agressividade ambiental considerável, é comum que pequenos indícios patológicos sejam elevados em um curto prazo. Por exemplo, problemas de fissuração podem acarretar a aceleração da degradação do concreto e corrosão do aço, já que permitem a entrada de agentes patológicos em camadas mais profundas em relação ao cobrimento da peça (CAMPOS et al, 2021). Além disso, com um nível de desgaste maior, o material tende a resistir menos aos esforços, podendo levar ao colapso da estrutura.

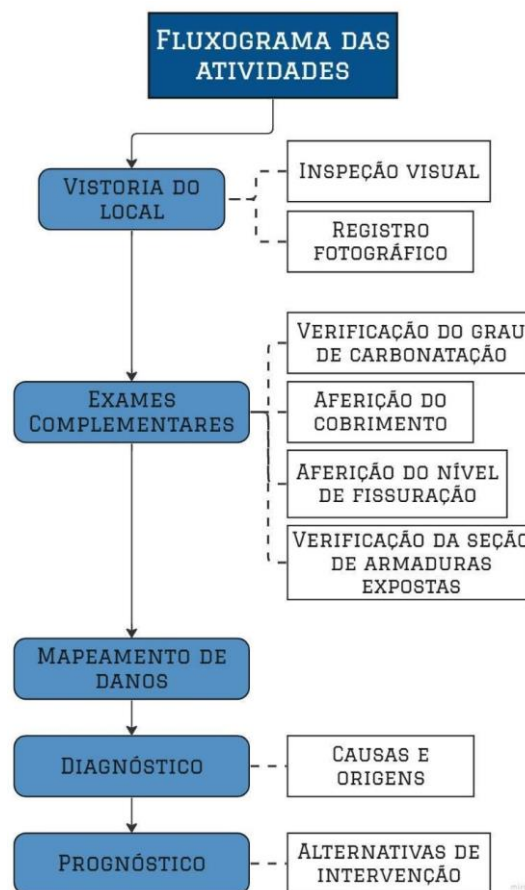
Tomando como exemplo, no estudo de caso da ponte Rio Barigui entre as cidades de Araucária e Curitiba - Paraná, Junior e Santos (2021) descrevem que foram evidenciadas patologias como deslocamento de concreto, nichos de concretagem, corrosão de armaduras, lixiviação e fissuras, além de manchas de fogo. Já Mascarenhas et al (2019), no estudo de caso da ponte Governador Magalhães Pinto, na cidade de Raposos - Minas Gerais, relatam a presença de vegetação em elementos estruturais (patologia biológica), corrosão de armaduras (patologia química), trincas, fissuras e exposição e degradação do concreto (patologias físicas).

Portanto, fica evidente que em pontes há, primeiramente, ocorrência comum de manifestações patológicas típicas do concreto, agravadas por fatores do meio em que estão inseridas e das altas solicitações estruturais. Além disso, choques acidentais contra a estrutura, incêndios e demais fatores não naturais, acarretam a degradação contínua da edificação, contribuindo para a proliferação patológica.

4 METODOLOGIA

O conhecimento científico é caracterizado por ser factual, contingente, sistemático, verificável, falível e aproximadamente exato. A combinação destes pontos o torna único em meio a outros tipos de conhecimento, favorecendo a divulgação de ideias e o desenvolvimento de técnicas (PEREIRA et al, 2018). Para tal, é necessário a utilização de metodologias que permitam a obtenção de resultados semelhantes em uma possível repetição da investigação (RICHARDSON, 1999). Portanto, a pesquisa científica deve ter ideias em ordem, de forma organizacional, a fim de alcançar os seus propósitos. Dessa forma, a Figura 13 demonstra as etapas utilizadas no presente trabalho.

Figura 13 – Procedimento metodológico



Fonte: Autor (2022)

O procedimento metodológico das atividades inicia-se na vistoria do local, onde o objeto será inspecionado de maneira preliminar, assim como realizados registros fotográficos. Para o aprofundamento do estudo, em sequência serão executados exames complementares, a

fim de verificar características que nortearão o diagnóstico. Em seguida, será realizado o mapeamento de danos, para identificar os pontos críticos observados. Então, após todos estes processos, o relatório de causas e origens será produzido, assim como as propostas de intervenção para solucionar os problemas identificados.

4.1 Classificação da pesquisa

Quanto à natureza, o tipo de pesquisa é classificado como aplicada, uma vez que é voltada a gerar conhecimento em busca de solucionar de forma prática situações específicas (THESAURUS, 2016).

Quanto à abordagem, a pesquisa é quantitativa no que diz respeito a descrição sobre os fenômenos observados. Para Theasaurus (2016), a abordagem quantitativa reúne respostas características, promovendo, desta forma, a comparação e análise de dados com maior facilidade. Todavia, a pesquisa também pode ser classificada como qualitativa, pois alguns eventos pesquisados não podem ser quantificados, findando apenas na explicação e compreensão do fenômeno, conforme as ideias de Gerhardt e Silveira (2009).

Já quanto aos objetivos da pesquisa, Gil (2007) descreve que o tipo de pesquisa exploratória visa tornar a aproximação e o conhecimento do problema mais amplo e de forma explícita para que o observador consiga levantar hipóteses.

Os procedimentos técnicos da pesquisa podem ser classificados em estudo de caso e pesquisa bibliográfica. Para Theasaurus (2016), o estudo de caso visa a descoberta e a interpretação de fenômenos em um contexto específico, focado em apenas uma unidade com análise profunda. Já Fonseca (2002), acerca da pesquisa bibliográfica, cita que a partir do estudo em referências teóricas já publicadas os trabalhos científicos são iniciados, permitindo ao pesquisador conhecer melhor o assunto e o objeto de estudo.

Figura 14 – Classificação da pesquisa



Fonte: Autor (2022)

4.2 Caracterização da área de estudo

Devido a localização da área de estudo situar-se exatamente na divisa entre os municípios de Cacimba de Dentro e Solânea, é necessário tomar como base as características das duas áreas para melhor uma melhor situação. Todavia, é importante ressaltar que o ambiente onde o objeto está inserido se assemelha mais às condições observadas em Cacimba de Dentro, sendo também de maior importância para o mesmo, do que para o município de Solânea.

4.2.1 Cacimba de Dentro

O município de Cacimba de Dentro possui 165,072 km² de extensão territorial, fica localizado na mesorregião do Agreste Paraibano e na microrregião do Curimataú Oriental e limitado entre os municípios de Araruna (ao norte e leste), Solânea (à leste e sul), Casserengue (à sudoeste), Damião (à oeste) e Cuité (à noroeste). A distância até a capital do estado, João Pessoa, é de 171 km, enquanto para a segunda maior cidade paraibana, Campina Grande, é de 82km (IBGE, 2022).

Figura 15 – Mapa de Cacimba de Dentro



Fonte: Wikipedia (2022)

Segundo o último censo divulgado pelo IBGE (2010), no ano de 2010 a população cacimbense era de 16.748 habitantes, com densidade demográfica de 102,32 habitantes/km². Já a estimativa de crescimento é para 17.169 habitantes em 2021.

De acordo com a SUDENE (2017), o município pertence ao semiárido brasileiro, cujos critérios estão relacionados ao índice pluviométrico e de aridez e o risco de secas na região, apresentando longos períodos de estiagem, com índice de precipitação baixo e chuvas mal

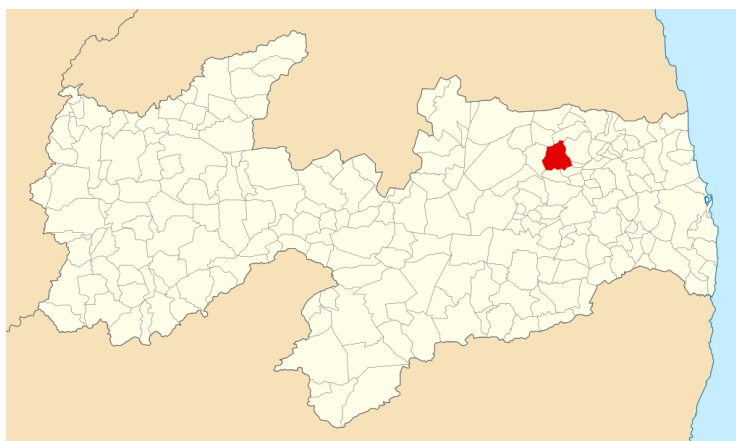
distribuídas. Todavia, sua localização em altitude de aproximadamente 536 metros acima do nível do mar proporciona um clima ameno, com temperaturas de até 17 °C no inverno.

Inserido na bacia hidrográfica do Rio Curimataú, todos os cursos d'água do município possuem regime intermitente e padrão de drenagem dendrítico. O clima semiárido e as características geológicas afetam também aspectos qualitativos das águas, com estudos indicando que as águas subterrâneas são predominantemente salinas e, em menor parte, salobras (CPRM, 2005).

4.2.2 Solânea

O município Solânea possui 233,043 km² de extensão territorial, localizado na mesorregião do Agreste Paraibano e na microrregião do Curimataú Oriental e limitado entre os municípios de Cacimba de Dentro e Dona Inês (ao norte), Bananeiras (à leste), Borborema (à sudeste), Arara e Serraria (ao sul) e Casserengue (à oeste). A distância até a capital do estado, João Pessoa, é de 171 km, enquanto para a segunda maior cidade paraibana, Campina Grande, é de 82km (IBGE, 2022).

Figura 16 – Mapa de Solânea



Fonte: Wikipedia (2022)

Segundo o último censo divulgado pelo IBGE (2010), no ano de 2010 a população solanense era de 26.693 habitantes, com densidade demográfica de 115,01 habitantes/km². Já a estimativa para 2021 é de decréscimo para 26.051 habitantes.

De acordo com a SUDENE (2017), o município também pertence ao semiárido brasileiro, através dos critérios de índice pluviométrico e aridez e o risco de secas na região. Sua

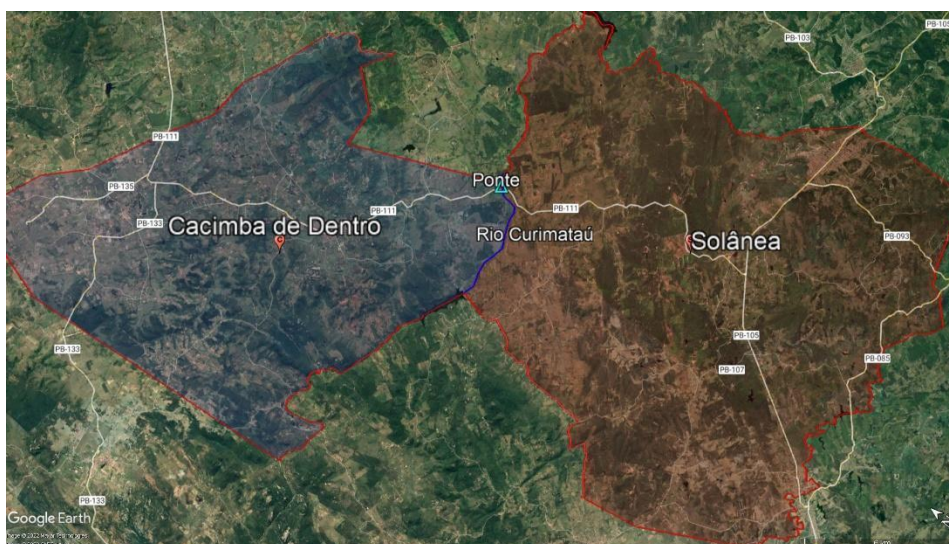
localização em altitude varia entre 650 a 1000 metros acima do nível do mar, com clima do tipo Tropical Chuvoso, com verão seco.

Inserido na bacia hidrográfica do Rio Curimataú, todos os cursos d'água do município possuem regime intermitente e padrão de drenagem dendrítico. Estudos indicam que as águas subterrâneas são predominantemente doces, com menor parte delas salinas e, em quantidade semelhante, salobras (CPRM, 2005).

4.3 Caracterização da estrutura

O objeto de estudo, denominado Ponte sobre o Rio Curimataú, está localizado nos limites territoriais dos municípios de Cacimba de Dentro e Solânea, no estado da Paraíba, delimitados pelo trajeto do Rio Curimataú, como apresentado na figura abaixo. A ponte pertence à rodovia PB-111, que integra a cidade de Cacimba de Dentro às demais cidades paraibanas, principalmente às vizinhas Solânea (através da PB-105), Araruna, e Damião (através da PB-133), além de dar acesso ao Rio Grande do Norte, passando por Araruna e Tacima.

Figura 17 – Localização do objeto de estudo



Fonte: Google Earth (2022)

De acordo com o Departamento de Estradas e Rodagens da Paraíba (DER-PB), a ponte possui data de projeto de janeiro de 1968. Todavia, não foram obtidas informações quanto à data de construção, nem a registros de reparos e recuperações estruturais realizados até o momento.

Devido ser a principal via de acesso à cidade de Cacimba de Dentro, o trecho onde a ponte está inserida (no sentido da cidade de Solânea) possui tráfego relativamente alto quando comparado a outros trechos da rodovia dentro dos limites do município, embora não seja tão expressivo quando comparado a regiões metropolitanas. Dessa forma, tomando ciência que o ambiente onde a estrutura está inserida poderia ser classificado como rural, o gás carbônico gerado pelo fluxo de veículos elimina essa condição, já que é prejudicial à estrutura, comparando-se ao ambiente urbano. Assim, é possível a classificação quanto à agressividade ambiental em nível moderado (classe de agressividade ambiental II), com pequeno risco de deterioração da estrutura. Todavia, é importante ressaltar que devido às características ambientais de aridez, as águas que atingem a estrutura são salobras, com teor de sais mais elevado que da água doce, aumentando significativamente o risco de deterioração da estrutura.

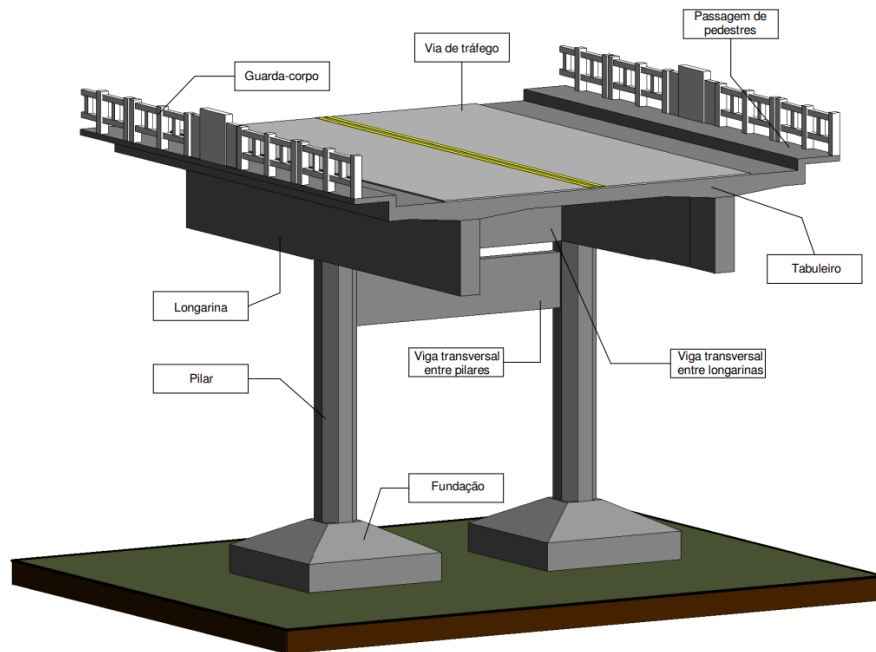
Figura 18 – Vista da ponte



Fonte: Autor (2022)

Quanto às características estruturais, a ponte possui altura total de 9 metros, 109 metros de extensão e 10,10 metros de largura, sendo 8,3 metros destinados à via de tráfego e 1,8 metros às duas passagens para pedestres. O vão total é dividido em seis partes, sustentados por dez pilares principais, duas vigas longarinas e vinte e quatro vigas transversais, sendo que cinco destas têm função de travamento dos pilares, enquanto dezenove interligam as longarinas. O esquema estrutural pode ser visto nas Figura 19 e 26.

Figura 19 – Detalhamento das partes constituintes da ponte



Fonte: Autor (2022)

4.4 Vistoria do local

4.4.1 Inspeção visual

Primeiramente, foi realizada a inspeção visual do objeto de estudo para entender a real situação e criar um plano preliminar de coleta de dados. Nessa etapa foram conferidos os elementos estruturais constituintes e identificados os pontos críticos (casos graves onde seria necessário maior atenção), além das principais manifestações patológicas existentes.

Figura 20 – Acesso para inspeção visual



Fonte: Autor (2022)

Dentre as manifestações mais evidentes, destacaram-se degradação do concreto, corrosão das armaduras em diversos níveis, lixiviação, trincas e fissuras, deslocamento e biodegradação ocasionada por infestações de marimbondos. Então, em uma análise primária, o estado de conservação da estrutura pode ser dado como precário, com sinais evidentes de intervenção urgente.

4.4.2 Registro fotográfico

Após a análise visual realizada e com os pontos de interesse detectados, foram realizados registros fotográficos dos elementos a fim de documentar e analisar posteriormente, auxiliando no mapeamento de danos. A importância da documentação com fotografias também se dá pelo interesse de verificar a evolução do caso em eventuais visitas posteriores.

4.5 Exames complementares

Para uma análise mais profunda do caso, se fez necessário a realização de inspeções complementares, utilizando equipamentos simples, mas que permitem compreender de forma mais abrangente a situação. No entanto, nas vigas e tabuleiro o estudo limitou-se à análise visual, devido às condições de acesso.

4.5.1 Medição de carbonatação

Com a identificação dos pontos críticos, foram selecionados os elementos com maior grau de agressão para a medição da profundidade de carbonatação. Estes elementos apresentavam deslocamento, trincas e fissuras e corrosão das armaduras, onde em alguns casos houve rompimento de seções de estribos e desprendimento de armaduras longitudinais do concreto. A Figura 21 demonstra as etapas executadas para esta verificação.

Figura 21 – Limpeza e aspersão de fenolftaleína para detectar carbonatação no concreto



Fonte: Autor (2022)

O procedimento consistiu na limpeza com pincel na área a ser estudada, seguido de aspersão de solução de fenolftaleína para indicar o pH do material naquela região, conforme a imagem acima.

O pH é identificado através da mudança de coloração na região onde a solução foi aspergida, variando entre incolor, rosa e carmim para diferentes faixas de pH. Nos casos em que o concreto está saudável a coloração deve ser carmim, indicando alta alcalinidade, com pH maior que 10. A medida que há perda de alcalinidade, a coloração fica rosa no caso de neutralidade (pH entre 8,0 e 10,0) ou incolor no caso de acidez (pH abaixo de 8), conforme a Figura 22.

Figura 22 – Coloração da Fenolftaleína em diferentes faixas de pH

INCOLOR pH < 8	ROSA 8 < pH < 10	CARMIM pH > 10
--------------------------	----------------------------	--------------------------

Fonte: Autor (2022)

4.5.2 Aferição do cobrimento

O cobrimento dos elementos foi aferido em casos em que houve deslocamento, com o auxílio de régua, nas estruturas onde foi possível obter acesso. A análise consistiu em verificar se o cobrimento executado está em conformidade com as medidas indicadas na NBR 6118 –

Projeto de estruturas de concreto (ABNT, 2014), de acordo com a classe de agressividade ambiental. A Figura 23 apresenta a aferição do cobrimento em um trecho de pilar.

Figura 23 – Aferição do cobrimento em um pilar



Fonte: Autor (2022)

4.5.3 Aferição do nível de fissuração

O nível de abertura das fendas foi verificado com a utilização de régua, diferenciando entre trincas e fissuras de acordo com o tamanho da abertura, como demonstrado na Figura 24.

Figura 24 – Aferição de fissuras em um pilar



Fonte: Autor (2022)

4.5.4 Verificação da seção de armaduras expostas

Nos casos em que a armadura apresentava-se exposta e com níveis de corrosão evidentes foi realizada a verificação da seção de aço com a utilização de um paquímetro. A análise se faz necessária para identificar o nível de corrosão da armadura e verificar se houve perda significativa da seção (seção menor que 60% da original). A Figura 25 retrata o esquema de verificação das seções de armaduras.

Figura 25 – Verificação da seção de uma armadura de pilar

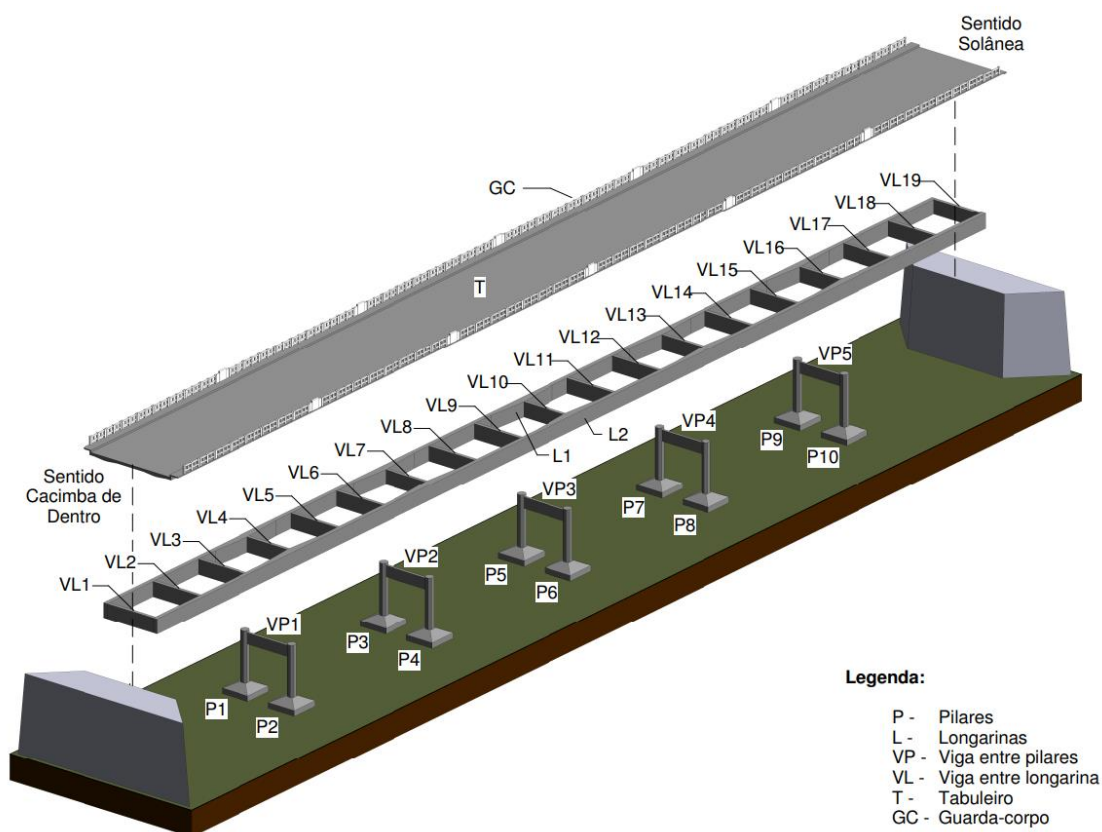


Fonte: Autor (2022)

4.6 Mapeamento de danos

Para uma análise global do estado de conservação e dos pontos críticos da estrutura, foi realizado o mapeamento de danos através de uma maquete eletrônica com dimensões aproximadas às reais. Houve a identificação dos elementos constituintes (pilares, vigas, tabuleiro, encontros, etc.) e o apontamento das peças de acordo com o tipo e o nível de manifestação patológica encontrada de acordo com a Figura 26.

Figura 26 – Representação estrutural da ponte



Fonte: Autor (2022)

4.7 Diagnóstico e prognóstico

Após as etapas predecessoras, foi realizada a análise acerca das causas e origens das manifestações patológicas encontradas, com a avaliação em um contexto abrangente, envolvendo diversas possibilidades, finalizando assim o diagnóstico. Já o prognóstico, ou seja, a avaliação de alternativas de intervenções foi realizada com base nas características e no nível de degradação dos elementos estruturais e de acordo com o tipo de patologia encontrado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Face às investigações realizadas durante as visitas ao objeto de estudo, foram constatadas diversas situações que envolvem manifestações patológicas em tipo e grau diferentes. O diagnóstico preliminar, realizado através de inspeção visual, mostrou que o estado de conservação da estrutura estava precário, observando presença agressiva de corrosões, trincas e fissuras, deslocamento e eflorescência em grande parte da estrutura, com destaque para alguns casos extremos, que merecem atenção imediata por parte dos órgãos responsáveis

Para ratificar a afirmativa preliminar do estado de conservação da obra de arte e confirmar as teses quanto às causas e origens dos problemas, alguns exames e medições foram realizados. O diagnóstico e o prognóstico estão dispostos nos tópicos abaixo, de acordo com o elemento estrutural estudado.

5.1 Manifestações observadas

5.1.1 Fundações

De imediato, observar uma fundação totalmente aparente certamente gerará alguns questionamentos, e o porquê de o fato ocorrer é o principal deles. Diferentemente da fundação dos demais pilares, as sapatas dos pilares P7, P8, P9 e P10 estão aparentes (Figura 27).

Figura 27 – Fundações dos pilares P7, P8, P9 e P10



Fonte: Autor (2022)

Estas sapatas estão apoiadas sobre uma camada de concreto regularizadora (lastro) que, por sua vez, estão sobre rocha sã que surge superficialmente por característica do terreno local, conforme observado na Figura 28, onde é possível ver parte desta rocha.

Figura 28 – Sapata apoiada sobre rocha sã



Fonte: Autor (2022)

Por estarem expostas, ficam sujeitas a intempéries que normalmente não estariam se estivessem sob o terreno, como ao carbono presente no ambiente e a maior contato com o oxigênio, além de possíveis danos físicos que possam sofrer, como erosão por abrasão ou impactos.

O principal dano observado é no lastro, onde a segregação do concreto ocorre em grandes proporções, destacando o agregado completamente após a perda da camada cimentícia. Os principais afetados são as fundações dos pilares P9 e P10, com ocorrência ligeiramente menor nas fundações dos pilares P7 e P8.

Dentre os observados, o lastro do pilar P9 é o mais danificado, onde a camada de cobertura de solo foi, em sua maioria, retirada por decorrência do fluxo de água (quando existe) e onde há acúmulo de água, favorecendo agentes patológicos que dependem de umidade (Figura 29). Ainda é possível observar parte de uma tábua de madeira presa entre o concreto, provavelmente utilizada como forma durante a execução da obra.

Figura 29 – Fundação do pilar P9

Fonte: Autor (2022)

Os lastros das sapatas dos pilares P8 e P10 apresentam condições semelhantes de segregação do concreto em proporções menores que o citado anteriormente, conforme Figura 30 b) e 30 c). No caso do lastro do pilar P7, a condição é a melhor dentre os quatro citados, com menor nível de segregação, visto na Figura 30 a).

Figura 30 – Fundações dos pilares P7, P8 e P10, respectivamente

(a)

(b)



(c)

Fonte: Autor (2022)

Contudo, a presença de corrosão das armaduras só foi observada na sapata do pilar P7, onde a perda da camada de cobrimento acarretou a sua exposição, dando início ao processo degradativo, exemplificado na Figura 31.

Figura 31 – Início de corrosão na sapata do pilar P7



Fonte: Autor (2022)

Nessa região destacada foram realizados os testes de pH com a solução de fenolftaleína, com a devida limpeza e aspersão do produto. O ensaio indicou que o pH do concreto está abaixo de 8,0, com o produto permanecendo incolor após a aplicação. Portanto, o processo de carbonatação está ativo de forma agressiva, acarretando a constante degradação do concreto e do aço.

Figura 32 – Durante e após o ensaio com fenolftaleína na sapata do pilar P7



Fonte: Autor (2022)

5.1.2 Pilares

Após a inspeção das fundações aparentes, os dez pilares existentes foram inspecionados individualmente, com destaque para os pilares P1, P3 e P5, que apresentaram os piores quadros de degradação, com deslocamento, trincas e fissuras, eflorescência e altos níveis de corrosão, ao ponto de perda completa de seções de estribos e diminuição das seções das armaduras principais.

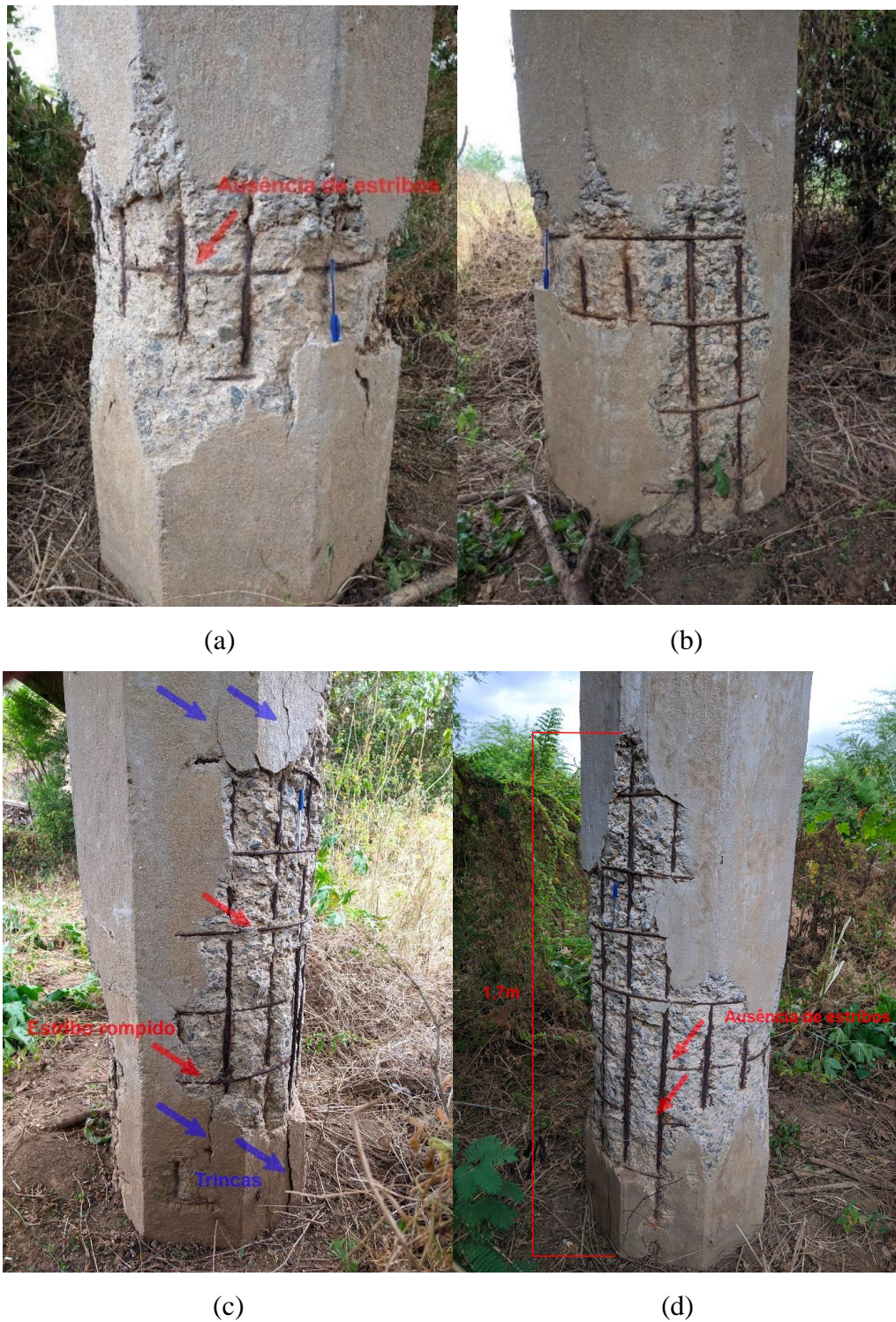
O pilar P1 apresentou deslocamento em toda sua circunferência, partindo do nível do solo até a altura máxima de 1,7 metros. A corrosão nessa região chegou ao ponto de romper estribos, com alguns deles chegando a perder trechos completos. As seções das armaduras principais também sofreram perda de seção, as medições realizadas estão dispostas no Quadro 5.

Quadro 5 – Diâmetro das armaduras expostas do pilar P1

Medição	Diâmetro (mm)	$A_{S_{corr}}$ (cm ²)	$A_{S_{inicial}}$ (cm ²)	Variação (%)
1	13,3	1,39	2,00	30,5
2	13,6	1,45	2,00	27,5
3	13,0	1,33	2,00	33,5

Fonte: Autor (2022)

Diante dos dados obtidos, como as medidas estão entre as bitolas de 12,5mm e 16mm, conclui-se que as armaduras possuíam bitola de 16mm e perderam seção durante o processo corrosivo. A diferença entre a área de aço original e a área atual demonstra que a perda de seção, com variação média de 30,5%, representa certo grau de risco para a estrutura. A Figura 33 retrata a situação do pilar.

Figura 33 – Manifestações patológicas no pilar P1

Fonte: Autor (2022)

Também fora identificado armaduras com desprendimento total do concreto, indicando que a degradação do concreto ultrapassou a camada de cobrimento e segue para o interior da

peça estrutural. A tese é confirmada após o teste de pH com fenolftaleína, onde a coloração permaneceu inalterada (pH abaixo de 8,0), indicando que há carbonatação agressiva no meio.

Figura 34 – Armadura principal sem aderência ao concreto



Fonte: Autor (2022)

A medição de trincas e fissuras indicou aberturas entre 1mm e 7,5mm, com padrão vertical, indicando a origem em detrimento dos esforços verticais, ou seja, de cargas suportadas pela estrutura. A origem também se correlaciona com a degradação do concreto por carbonatação e pela expansão das armaduras devido à corrosão, impulsionando a formação de trincas e fissuras.

As aberturas medidas superam expressivamente os limites indicados na NBR 6118 (ABNT, 2014) para a classe de agressividade ambiental pertencente (CAA II), conforme exposto na Tabela 3, onde a abertura máxima sugerida é de 0,3mm. Além disso, a norma de desempenho (ABNT NBR 15575-2, 2013) especifica que os componentes estruturais não podem apresentar aberturas superiores a 0,6mm em qualquer situação. Logo, as medidas acima dos parâmetros esperados indicam que há risco para a integridade da estrutura e para os usuários, se enquadrando nos Estados Limites de Serviço descrito em ambas as normas.

Já os pilares P3 (Figura 35) e P5 (Figura 36) apresentaram condições semelhantes, porém com degradação ligeiramente menor que no pilar P1. As particularidades ocorrem no pilar P3, com a lixiviação em parte considerável do seu corpo e, no pilar P5, com a segregação do concreto mais evidente que nos demais pilares. Ademais, as mesmas manifestações estão

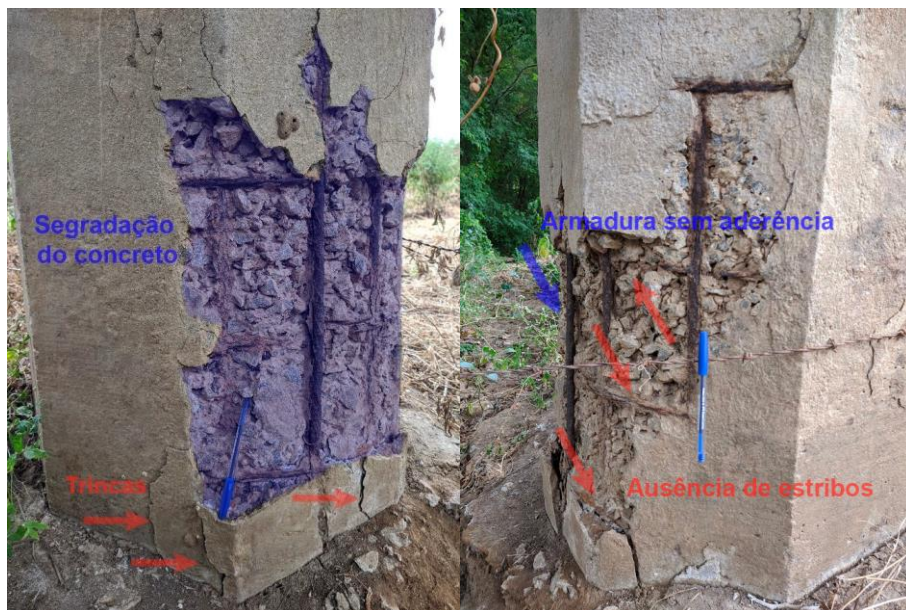
presentes, incluindo o nível de acidez, perda de seções de armaduras principais e rompimento de estribos.

Figura 35 – Manifestações patológicas no pilar P3



Fonte: Autor (2022)

Figura 36 – Manifestações patológicas no pilar P5



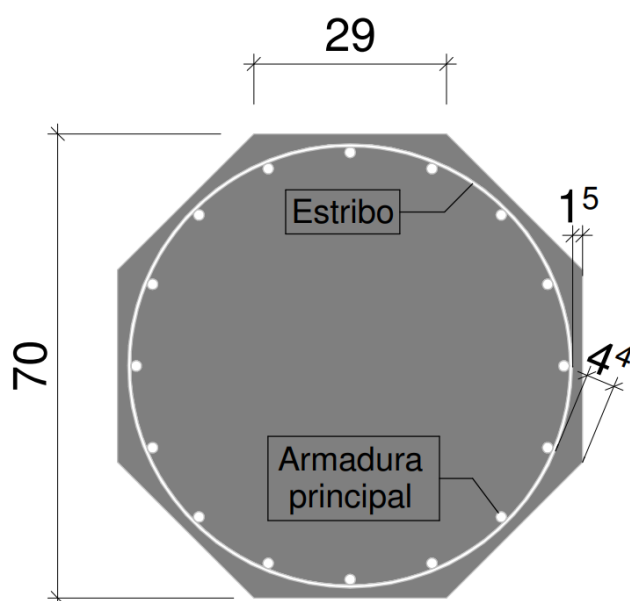
Fonte: Autor (2022)

Nos pilares P2, P4 e P6 foram observadas trincas e fissuras nas suas bases, início de corrosão das armaduras (principalmente estribos) e início de deslocamento. Já os pilares P7, P8, P9 e P10 apresentaram a melhor integridade física dentre todos. Tal fato pode estar

relacionado ao contato com o solo que, diferentemente dos outros pilares, estes não possuem, já que as fundações estão sobre o nível do solo pelos motivos citados no item 5.1.1.

Entretanto, todos os pilares apresentam problemas de cobrimento. A afirmativa surge a partir da discordância entre as formas geométricas da armadura e do concreto. Conforme mostrado na Figura 37, os pilares possuem formato octogonal, enquanto as armaduras possuem o formato circular. A adoção deste formato se deu provavelmente por questões construtivas, já que é mais prático confeccionar formas poligonais do que circulares. Essa escolha não traria problemas, desde que respeitado o cobrimento mínimo nas partes de maior proximidade entre circunferência (armadura) e o plano (face da forma), o que na prática não ocorreu.

Figura 37 – Representação geométrica da seção dos pilares



Fonte: Autor (2022)

Observa-se que o menor cobrimento não respeita o cobrimento mínimo de 30mm disposto na NBR 6118 (ABNT, 2014), de acordo com a classe de agressividade ambiental pertencente (Classe II). As medidas foram colhidas no pilar P1 (Figura 38), mas diferem em outros pilares, com redução do cobrimento, provavelmente causado pela não utilização de espaçadores durante a execução da obra.

Figura 38 – Medição de cobrimento mínimo e máximo, respectivamente, no pilar P1



Fonte: Autor (2022)

Dessa forma, com o cobrimento praticamente inexistente nos casos mais graves, a degradação inicia-se nos estribos, servindo de entrada para agentes patológicos atingirem outras partes da estrutura. A Figura 39 retrata a ocorrência deste fenômeno que atinge todos os pilares.

Figura 39 – Degradação dos estribos sujeitos a cobrimento inferior ao mínimo no pilar P5



Fonte: Autor (2022)

5.1.3 Vigas transversais entre pilares e entre longarinas

Nas vigas transversais foram observadas maiores concentrações de eflorescência e manchas escuras que indicam oxidação da armadura, além de deslocamento e exposição das armaduras em alguns casos. Entretanto, as vigas transversais entre pilares demonstram melhor estado de conservação do que as vigas entre longarinas, apresentando menor grau de deslocamento e corrosão de armaduras. A Figura 40 apresenta o pior caso entre as vigas transversais, com deslocamento da camada inferior e grandes quantidades de manchas na viga entre longarinas.

Figura 40 – Manchas de eflorescência e de oxidação em vigas transversais



Fonte: Autor (2022)

A presença majoritária de manchas nas vigas transversais entre longarinas pode ser ocasionada por infiltrações no tabuleiro. Uma vez que as águas atingem a estrutura, dissolvem sais presentes na pasta cimentícia endurecida através do processo de lixiviação, causando as manchas esbranquiçadas (eflorescência). Além disso, a entrada de água pelos poros e fissuras do concreto pode atingir as armaduras, carregando o óxido de ferro da camada passivadora, causando manchas escuras no elemento.

5.1.4 Longarinas

Assim como as vigas transversais, as longarinas apresentam grandes quantidades de eflorescência e manchas de oxidação e alguns pontos de deslocamento e exposição da armadura. Contudo, na longarina L1, entre os pilares P1 e P3 e entre os pilares P2 e P4 na longarina L2 ocorre manifestação singular, com agressividade extrema, observado nas Figuras 41 e 42.

Figura 41 – Longarina entre o pilar P1 e P3



Fonte: Autor (2022)

No trecho entre o pilar P1 e P3, ocorre deslocamento da parte inferior da longarina L1 em uma extensão de cerca de 5 metros, com deterioração extrema das armaduras e do concreto. Praticamente todos os estribos expostos estão rompidos devido a corrosão. O nível de deterioração do concreto pode ser decorrente de diversos fatores, incluindo a possibilidade de baixo controle tecnológico durante a execução da obra, já que é apenas nesse trecho que ocorre tamanha degradação. Ainda, as fortes manchas de oxidação presentes no corpo da longarina indicam que também está ocorrendo corrosão das armaduras de pele.

Figura 42 – Longarina entre o pilar P2 e P4



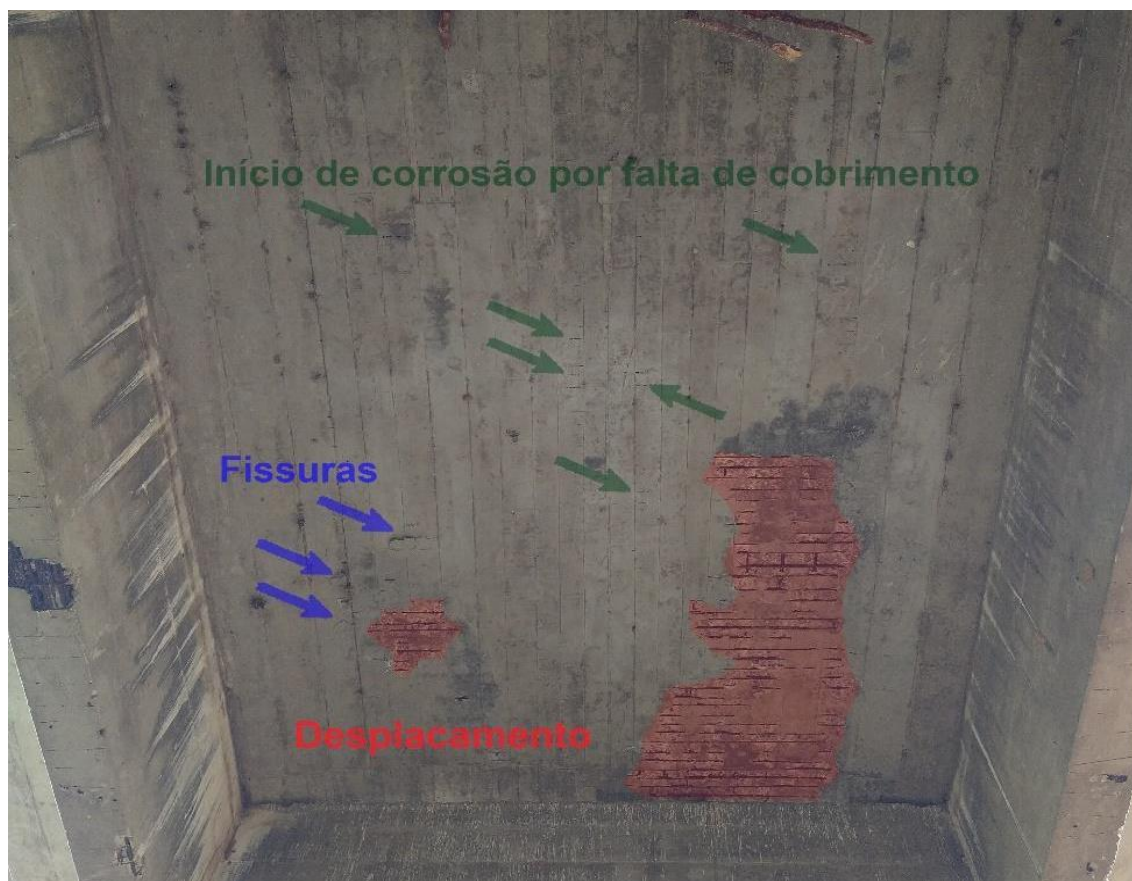
Fonte: Autor (2022)

De maneira análoga, o trecho entre o pilar P2 e P3, na longarina L2, sofre com deslocamento em extensão de aproximadamente 3 metros, com rompimento de alguns estribos. Todavia, o nível de degradação é menor do que o trecho citado anteriormente, com menor índice de deterioração do concreto e poucas manchas de oxidação no seu corpo.

5.1.5 Tabuleiro

Dentre os elementos estruturais analisados, o tabuleiro foi o que menos apresentou problemas. As manifestações observadas foram trincas e fissuras, deslocamento e corrosão das armaduras. Conforme visto na Figura 43, os deslocamentos observados podem ser ocasionados pelo esforço de flexão por momento positivo, que evoluiu de fissuras para maiores níveis de degradação do concreto e, conseqüentemente, resultaram na perda do cobrimento das armaduras.

Figura 43 – Manifestações patológicas em parte do tabuleiro



Fonte: Autor (2022)

Outra hipótese para a degradação é que em alguns pontos a camada de cobrimento está abaixo da mínima indicada em norma, já que, assim como no caso dos pilares, foi observado início de corrosão em armaduras com camada de cobrimento praticamente inexistente.

5.1.6 Guarda-corpo

O estado de conservação dos guarda-corpos é precário. Por inspeção visual notou-se o comprometimento do concreto e das armaduras, com perda de camadas e fissuras e oxidação das barras, respectivamente (Figura 44). Todavia, por mais que não exerçam função estrutural ativa, é importante que se mantenha a integridade destes elementos, pois estas proteções podem evitar que veículos (em caso de acidentes) e pedestres caiam da plataforma, tendo esta como sua função principal.

Figura 44 – Guarda-corpo deteriorado

Fonte: Autor (2022)

As manifestações se repetem em todos os guarda-corpos, diferenciando-se apenas no grau em que surgem. Outro fato é que por conta da pintura realizada nestes elementos, não foi possível verificar de maneira eficiente o nível de carbonatação que estão sujeitos.

5.2 Mapeamento de danos

Através da inspeção realizada, para uma análise numérica das manifestações encontradas, se faz necessário o mapeamento e a quantificação dos elementos danificados. Para isso, a tabela abaixo (Quadro 6) identifica as patologias encontradas em todos os elementos analisados, de acordo com a caracterização expressa na Figura 26.

Quadro 6 - Manifestações patológicas observadas em cada elemento estrutural

Elemento		Manifestação Patológica Observada					
Tipo	Nº	Trincas e fissuras	Corrosão de armaduras	Desplacamento	Segregação	Eflorescência	Carbonatação*
Fundação	7		x	x	x		x
	8		x		x		
	9				x		
	10				x		
Pilar	1	x	x	x	x		x
	2	x	x	x			
	3	x	x	x	x	x	x

Elemento		Manifestação Patológica Observada					
Tipo	Nº	Trincas e fissuras	Corrosão de armaduras	Desplacamento	Segregação	Eflorescência	Carbonatação*
Pilar	4	x	x	x		x	
	5	x	x	x	x	x	x
	6	x	x	x			
	7		x				
	8		x				
	9		x			x	
	10		x			x	
Longarina	1	x	x	x		x	
	2	x	x	x		x	
Viga entre pilares	1	x				x	
	2					x	
	3					x	
	4					x	
	5					x	
Viga entre longarinas	1	x	x			x	
	2					x	
	3					x	
	4		x			x	
	5					x	
	6					x	
	7	x	x	x		x	
	8					x	
	9					x	
	10					x	
	11					x	
	12					x	
	13					x	
	14					x	
	15					x	
	16	x	x	x		x	
	17					x	
	18		x			x	
	19	x	x	x		x	
Tabuleiro	-	x	x	x		x	
Guarda-corpo	-	x	x	x			
TOTAL		15	21	14	7	32	4*

* Analisado em apenas alguns elementos.

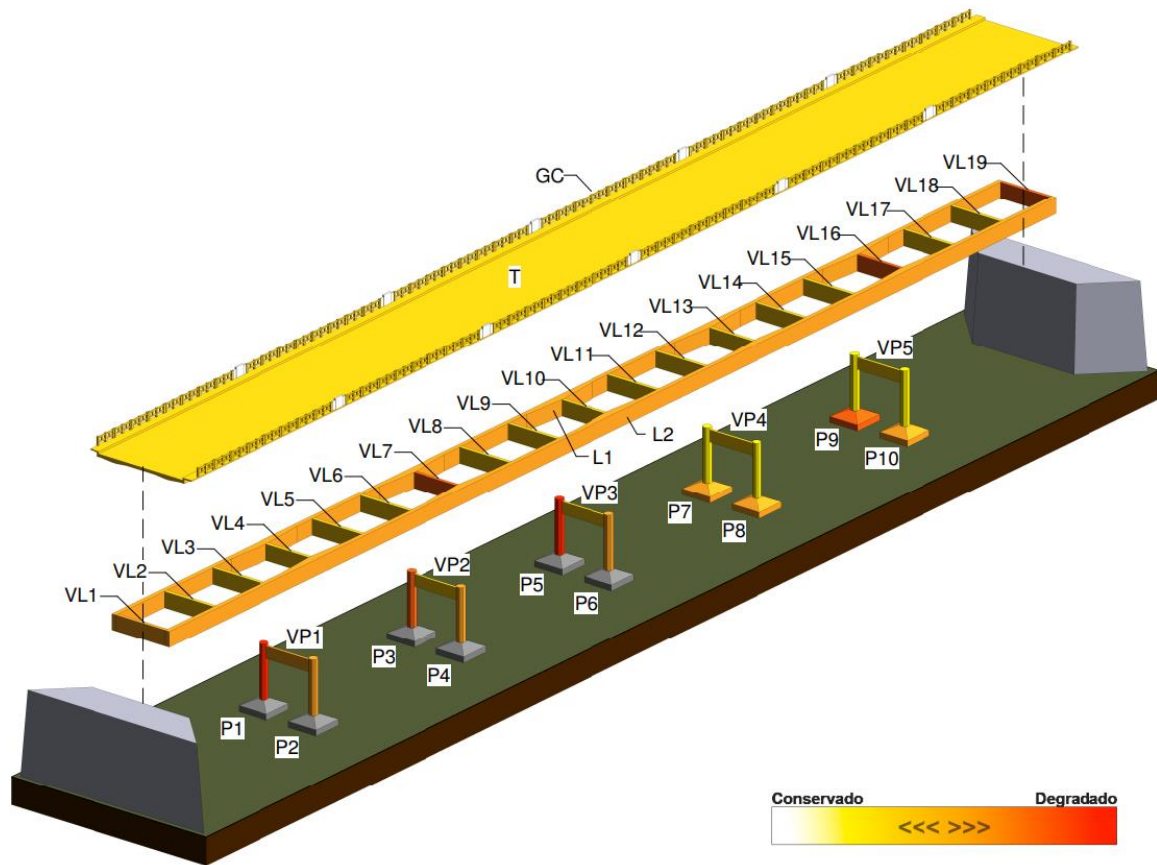
Fonte: Autor, (2022)

Diante disso, a quantificação das manifestações mostra que a eflorescência é a manifestação que atinge mais elementos, seguido da corrosão de armaduras, trincas e fissuras

e deslocamento, respectivamente. Entretanto, a eflorescência é a que representa menor risco para a estrutura, dentre as patologias citadas.

Esta análise se torna incompleta se não for observado o nível de degradação que cada elemento está sujeito, de acordo com os tipos de problemas encontrados, pois a quantificação não leva em consideração este ponto. Para isso, em termos visuais, a Figura 45 demonstra os pontos críticos da estrutura.

Figura 45 – Pontos críticos da estrutura



Fonte: Autor (2022)

A partir da visualização dos elementos mais degradados, o estado de conservação da ponte se torna mais compreensível. Vale salientar que esta escala é subjetiva, pois, a exemplo das longarinas, existem setores mais e menos degradados em toda sua extensão. Portanto, a escala representa a média entre estes setores.

5.3 Causas e soluções

De posse das informações colhidas em campo, é possível investigar as manifestações observadas, de forma a compreender melhor as origens e propor soluções de forma eficiente. Desta forma se dá a importância da profundidade da análise preliminar e dos exames complementares.

As fissuras possuem diferentes origens, tornando a análise mais abrangente e superficial, já que podem ser relacionadas desde a aspectos construtivos, até a deterioração da estrutura. No entanto, o estado de oxidação das armaduras, o baixo pH do concreto e o deslocamento de grandes áreas de concreto indicam que as principais causas estejam primeiramente no enfraquecimento do concreto, permitindo a entrada de agentes patológicos no seu interstício, e posteriormente na corrosão das armaduras, já que há o aumento em até 10% do volume em barras sujeitas a corrosão, gerando tensões de tração no interior do concreto, às quais resultam em fissuras.

Com a evolução do quadro, as aberturas das fissuras aumentam, evoluindo para trincas e, nos casos mais severos, no deslocamento da camada de cobrimento. Todavia, não são descartados que fissuras geradas durante a cura do concreto possam ter agravado estes problemas, acelerando o processo degradativo. Contudo, para o entendimento melhor do quadro de fissuração e do risco real que representam, deve-se haver acompanhamento dos casos, para detectar se há fissuras ativas.

O tratamento de trincas e fissuras pode ser feito, primeiramente, identificando o tipo de fissura (ativa ou passiva) e da necessidade de reforços estruturais (nos casos em que o elemento perde capacidade de suporte às cargas impostas). Para as fissuras ativas, deve-se identificar e eliminar o causador destas, tornando-as passivas novamente. Assim, as fissuras passivas podem ser tratadas com a técnica de vedação por injeção, tornando a peça novamente monolítica através da aplicação de resina epóxi injetada nas aberturas (SOUZA E RIPPER, 2009).

Já os casos de corrosão das armaduras devem ser analisados mais profundamente, uma vez que foram verificados casos de corrosão extrema, com rompimento de estribos e perda de seção em armaduras principais. Como já citado anteriormente, a sucessão de problemas patológicos acarreta o agravamento da situação, onde a exposição das armaduras através do deslocamento do concreto desencadeia o processo corrosivo agressivo, gerado principalmente pela despassivação da armadura através da carbonatação e por ataques de cloretos, que, na presença de umidade e de oxigênio, resultam na degradação do aço.

De acordo com Souza e Ripper (2009), é comum adotar o limite de perda de seção de armaduras em 15% da seção original. Ou seja, quando a armadura tiver apenas 85% de sua área original, é necessário a complementação por adição de barras, para que seja atingida a área de

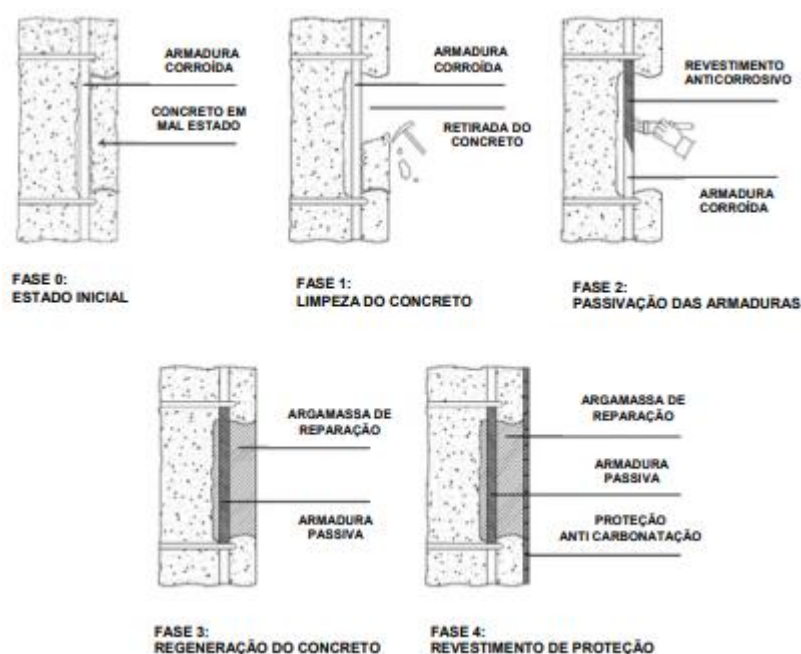
ação original de projeto. Já de acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2006), se a perda for superior a 10%, as barras devem ser suplementadas.

Como observado na Tabela 6, as barras analisadas superaram este limite, portanto, há a necessidade de reforço com armaduras de complementação. Já os estribos devem ser substituídos completamente quando rompidos, além de sujeitos a mesma verificação de complementação.

As armaduras corroídas ainda devem passar por tratamento, primeiramente com a retirada de todo e qualquer concreto em mal estado, seguido de jateamento de areia ou água para que qualquer resíduo de concreto ou corrosão sejam retirados. Logo após, para garantir novamente a sua passivação, deve ser aplicado revestimento anticorrosivo em uma ou duas camadas (PELLICER et al, 2016).

A recuperação do concreto também é essencial para a estrutura. Os testes de pH com fenolftaleína indicaram que o concreto está sofrendo com altos níveis de carbonatação, logo é necessário a remoção da camada de concreto que possui essa condição e dos trechos que estiverem fissurados ou trincados, ou ainda apresentarem quaisquer indícios de má qualidade. Após isso, deve ser feita recomposição do concreto e, como há forte influência do gás carbônico na estrutura, pode também ser feito o revestimento de proteção anti carbonatação, garantindo a durabilidade do elemento. A Figura 46 apresenta o passo-a-passo da recuperação de elementos de concreto armado sujeitos a corrosão e degradação do concreto.

Figura 46 - Recuperação de elementos estruturais



Fonte: Adaptado de Pellicer et al (2016)

Quanto aos trechos que apresentam eflorescência, as causas são relacionadas ao contato do elemento com a água, que transporta sais solúveis presentes nos materiais do concreto, cuja solidificação forma depósitos esbranquiçados.

Para o tratamento, primeiramente pode ser realizado o método de remoção mecânica, com a utilização de escovas, já que é um método de fácil execução e que não permite a reabsorção dos sais pelo material. Já a segunda opção é realizar a limpeza com ácido acético. Porém, para a garantia do não surgimento de eflorescência, ainda pode ser feita a impermeabilização dos elementos, impedindo que a água adentre no concreto e ocorra a lixiviação.

6 CONCLUSÃO

A investigação, tanto no aspecto visual, como na quantificação dos problemas patológicos, trouxe resultados insatisfatórios quanto ao estado de conservação da ponte. A manifestação patológica mais recorrente foi a eflorescência, atingindo cerca de 76% dos elementos vistoriados. No entanto, a ocorrência de eflorescência pode não trazer grandes prejuízos imediatos a edificação quanto outras patologias. Já a presença de trincas e fissuras, de corrosão de armaduras e do deslocamento formam o conjunto mais agressivo e prejudicial para a estrutura, onde apenas cerca de 31% dos elementos são submetidos a estas patologias, mas se tornam críticos devido a seu grau de evolução, unidos pelo baixo pH do concreto, pela perda de seção e rompimento de armaduras e por grandes áreas atingidas pelo desprendimento da camada de cobrimento.

Embora as causas das trincas e fissuras sejam principalmente pela corrosão das armaduras e do enfraquecimento do concreto, as observações feitas mostraram que as fissuras podem representar ameaça à integridade estrutural e aos usuários, onde, mesmo que aparentem limitar-se à camada de cobrimento dos elementos, apresentam abertura maior que o limite de segurança exposto na NBR 6118, pelo não atendimento ao critério de Estado Limite de Serviço para fissuras (ABNT, 2014).

Já o mapeamento dos pontos críticos demonstrou que as peças mais danificadas são os pilares e as vigas longarinas, sendo nelas encontradas todos os tipos de manifestações patológicas citadas.

Ao final, foi possível relatar as causas prováveis para os problemas encontrados, relacionados primeiramente à degradação do concreto por carbonatação e lixiviação, que facilita a oxidação e corrosão das armaduras e, conseqüentemente, resulta em trincas e fissuras e na perda da camada de cobertura. Definidas as hipóteses, tornou-se viável averiguar as soluções que seriam de possível implementação, tendo em vista o nível de degradação ao qual a edificação está sujeita.

Portanto, é factual a importância da inspeção recorrente, assim como da manutenção nesse tipo de edificação. Tomando como base o nível de degradação dos elementos críticos, é notório que não houve realização de manutenções preventivas para retardar os efeitos danosos. Logo, por mais que não haja risco iminente de colapso por conta das manifestações encontradas, se não tomadas as devidas providências, a durabilidade da estrutura tende a ser reduzida drasticamente com a evolução dos casos.

Para o aprofundamento da análise de manifestações patológicas, estudos futuros podem ser realizados, como a influência do clima e da biodegradação gerada em estruturas de concreto armado no semiárido nordestino, assim como o real nível de agressividade ambiental que o bioma oferece a estas estruturas, principalmente em obras de arte especiais.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.
- AGUIAR, José. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. 2006. Dissertação (Mestre em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 1v. Rio Grande: Editora Dunas, 4. ed., 2014.
- BASTOS, Paulo. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru, 2019. (Apostila). Disponível em: www.feb.unesp.br/pbastos. Acesso em: 09 jun. 2022.
- BOLINA, Fabrício *et al.* **Patologia de Estruturas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**. Diagnóstico do município de Cacimba de Dentro, estado da Paraíba. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**. Diagnóstico do município de Solânea, estado da Paraíba. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.
- BRITZ, Alexandre. Desempenho aplicado às estruturas de concreto armado. **Revista Estrutura**, São Paulo, 5 ed, ano 2, P 61-62, 2018.
- CAMPOS, Clarice *et al.* **Estudo sobre patologias em pontes**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.12, p. 120720-120734, 2021.
- CAU – Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil. **Guia para arquitetos na aplicação da norma de desempenho**. AsBEA, 2016.
- CAVALCANTE, Gustavo H F. **Pontes em concreto armado: análise e dimensionamento**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2019.
- CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Desempenho de edificações habitacionais: Guia para atendimento à norma ABNT 15575/2013**. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CRAUSS, Camila. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

EL DEBS, Mounir; TAKEYA, Toshiaki. **Introdução às pontes de concreto**. São Carlos: USP, 2007. Apostila.

FERREIRA, Ricardo. **Patologias em estruturas de concreto armado**. 2018. TCC (Bacharel em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências Humanas e Sociais da Fundação Carmelitana Mário Palmério, Monte Carmelo, 2018.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

FUSCO, Péricles. **Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos Aplicados**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008.

GERHARDT, Tatiana; SILVEIRA, Denise. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007

GÓIS, Thaís. **Estudo da corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI) em estruturas de saneamento**. 2016. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JUNIOR, Emerson; SANTOS, Marlon. **Manifestações patológicas em pontes de concreto armado: estudo de caso referente à ponte rio Barigui**. 2021. Artigo (Bacharel em Engenharia Civil) - UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá, Curitiba, 2021.

MAIA, J. P. (2009). **Otimização estrutural: estudo e aplicações em problemas clássicos de vigas utilizando a ferramenta Solver**. (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Estrutura). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brasil.

MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 237 p.

MASCARENHAS, Fernando *et al.* **Patologias e inspeção de pontes em concreto armado: Estudo de caso da ponte Governador Magalhães Pinto**. ENGEVISTA, V. 21, n.2, p.288-302, 2019.

MEDEIROS, Marcelo *et al.* **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

MORAIS, R. S. **Patologias geradas por erros de execução de estrutura de concreto armado: causas, medidas preventivas e consequências**. 2017. TCC (Tecnólogo em construção civil) - Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, 2017.

MORAIS, JMP *et al.* 2020. Analysis of pathological manifestations in reinforced concrete structures: a review. **Research, Society and Development**, 9(7): 1-32, e759974964.

OLIVEIRA, Antônio. **Corrosão e tratamento de superfície**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012. Apostila.

OLIVEIRA, Eloisa; MEDEIROS, Isadora. **Investigação da relação vida útil e a durabilidade das estruturas de concreto armado frente às práticas empregadas no mercado para produção de concreto**. 2019. TCC (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2019.

PELLICER, Teresa M.; Calderón, Pedro A.; Ortega, A. Irene. **Reparación de pilares de hormigón armado: proyecto y ejecución**. 2016. Burgos, Espanha.

PEREIRA, A. S. et al. **Metodologia da pesquisa científica**. 1. ed. Santa Maria, RS: UFSM, NTE, 2018.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

SOUZA, Vicente; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. 5. ti. São Paulo: Pini, 2009.

SUDENE. **Delimitação do Semiárido**. 2017. Disponível em: <<http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>>. Acesso em: 15 out. 2022.

VALENÇA, Daniel. **Análise da deterioração do concreto por carbonatação natural com exposição às classes de agressividade ambiental marinha e respingos de maré**. 2016. TCC (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

VALERIANO, Ricardo. **Pontes**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

VITÓRIO, José. Vistorias, conservação e gestão de pontes e viadutos de concreto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 48, 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

VITÓRIO, José. **Pontes e viadutos rodoviários: conceituação, conservação, segurança e reforço estrutural**. 2015. Disponível em: <https://vitorioemelo.com.br/publicacoes/Pontes_Viadutos_Rodoviaros.pdf>. Acesso em: 23 set. 2022.

ZEQUIM, T. M. **Estudo dos métodos de previsão de vida útil de estruturas em concreto armado de edificações em norma brasileira e estrangeiras**. 2017. 4 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, PA, 2017.