



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JAKSON IGO SOARES SENA

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM DUAS PONTES DE
CONCRETO ARMADO NA MICRORREGIÃO DO AGRESTE DO RIO GRANDE DO
NORTE - ESTUDO DE CASO**

**ARARUNA - PB
2022**

JAKSON IGO SOARES SENA

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM DUAS PONTES DE
CONCRETO ARMADO NA MICRORREGIÃO DO AGRESTE DO RIO GRANDE DO
NORTE - ESTUDO DE CASO**

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

Área de concentração: Patologia das estruturas.

Orientadora: Prof^a. Ma. Lays Raianne Azevedo da Costa.

**ARARUNA - PB
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.

S474a Sena, Jakson Igo Soares.
Análise das manifestações patológicas em duas pontes de concreto armado na microrregião do agreste do Rio Grande do Norte [manuscrito] : estudo de caso / Jakson Igo Soares Sena. - 2022.
80 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2022.
"Orientação : Profa. Ma. Lays Raianne Azevedo da Costa ,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Análise de estrutura. 2. Conservação. 3. Estruturas. I.
Título

21. ed. CDD 624.17

JAKSON IGO SOARES SENA

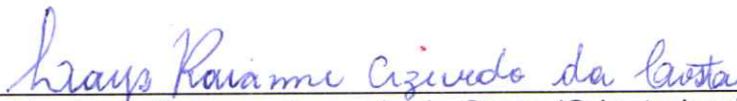
ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM DUAS PONTES DE
CONCRETO ARMADO NA MICRORREGIÃO DO AGRESTE DO RIO GRANDE DO
NORTE - ESTUDO DE CASO

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

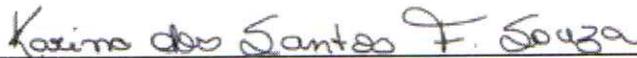
Área de concentração: Patologia das
estruturas.

Aprovado em: 27/07/22.

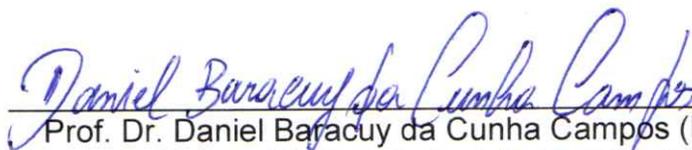
BANCA EXAMINADORA



Prof^ª. Me. Lays Raimme Azevedo da Costa (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



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



Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos (Examinador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

A Deus, por guiar meu caminho, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida, pelo cuidado e proteção.

Em especial, agradeço à minha mãe, que desde quando era pequeno, me incentivou a estudar, e sempre afirmou que era esse o meio de ser um vencedor. Ainda agradeço à minha mãe, que juntamente com a minha irmã sempre estiveram ao meu lado, me incentivando e acreditando no meu potencial, e por serem na terra a razão de toda a minha dedicação.

Aos meus familiares e amigos do CRAS que estão ao meu lado durante essa trajetória.

A todos os meus colegas e amigos que a universidade proporcionou, em especial, Brenda, João Pedro, Rafaela, Tiago e toda a família Pilares Consultoria Júnior, pelo carinho e companheirismo nesta caminhada estudantil.

Aos professores, que se empenharam em repassar conhecimento e por formarem o profissional que sou hoje, em especial a professora Lays Rianne pela orientação no TCC.

A todos os demais funcionários do Campus VIII, que direta ou indiretamente ajudaram na minha formação.

RESUMO

As pontes, também chamadas de obras de arte especiais, apresentam uma vida útil de projeto elevada, cerca de 100 anos, embora isso não signifique que não se deva ter cuidados ou que as mesmas sejam eternas. A ausência de manutenção preventiva atreladas à ação das intempéries contribuem para que as pontes adquiram, com o passar do tempo, diversas manifestações patológicas. O objetivo do trabalho foi realizar a análise das principais manifestações patológicas presentes em duas pontes de concreto armado na microrregião agreste potiguar, além de fazer o reconhecimento das causas dessas manifestações patológicas, e através desse reconhecimento, propor possíveis soluções a serem tomadas para a resolução do problema. A metodologia deste estudo consistiu em realizar inspeções *in loco* com registro fotográfico para identificação das manifestações patológicas, bem como foram realizados ensaios de verificação de profundidade de carbonatação, medição de abertura de fissuras e medição do cobrimento do concreto em pilares. A ponte localizada no município de Lagoa d'Anta apresentou corrosão em diversos elementos, eflorescência, fissuras com abertura dez vezes maior do que o permitido pela NBR 6118/2014 para fissuras em serviço, além de pilares com segregação do concreto e áreas onde foram aspergidas a fenolftaleína completamente carbonatadas. Já a ponte Regis Bittencourt, do município de Nova Cruz/RN, apresentou corrosão no tabuleiro da ponte, eflorescência, biodeterioração e pilares com redução na seção. Tendo em vista o nível de corrosão e degradação observados nas pontes, é possível concluir que as duas pontes estudadas necessitam de reparos, e, caso não sejam reparadas, acarretará em uma diminuição na vida útil de tais estruturas.

Palavras-chave: Patologia. Conservação. Estruturas.

ABSTRACT

As bridges, called special works of art, have a high design lifespan, about 100 years, although this does not mean that care should not be taken or that they are eternal. The absence of prevention of inclement weather contributing to bridges and pathological manifestations contributing to bridges and pathological manifestations. The objective of the work was to carry out the analysis of the main pathological manifestations presented in two bridges Agreste Potiguar in the Agreste Potiguar micro-region, in addition to recognizing the pathological manifestations, and through this recognition, proposing possible solutions to be taken for a resolution of the work problem. The methodology of this consists of carrying out identification inspection with photographic record for manifestations of the manifestations, as well as tests were carried out to verify the depth of carbonation to determine the study of concrete opening in pillars. The bridge in the municipality of Fissure located in Lagoa d'Anta, in addition to stains on several elements, and cracks with openings for cracks larger than that allowed by NBR 6118/2014 concrete in service, in addition to pillars with segregation of the and areas where they were sprinkled phenolphthalein fully carbonated. The Regis Bittencourt bridge, in the municipality of Nova Cruz/RN, presented on the bridge deck, efflorescence, reduced biodeterioration and pillars with reduction in the section. Since structures, level and construction are not observed, bridges are designed for repairs, and can be constructed as repair bridges, built on an elevation of such structures.

Keywords: Pathology. Conservation. structures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos constituintes das pontes	15
Figura 2 - Tipos de vigas.....	16
Figura 3 – Seção transversal de um tabuleiro de pontes e seus elementos	17
Figura 4 – Classes de agressividade ambiental (CAA).....	21
Figura 5 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento	22
Figura 6 – Fissuração em função da classe de agressividade ambiental	23
Figura 7 – Perda de seção na barra devido à corrosão eletroquímica.....	24
Figura 8 – Mecanismo de corrosão do aço no concreto	25
Figura 9 – Representação esquemática das fissuras por corrosão	25
Figura 10 – Esquematisação do processo de carbonatação	26
Figura 11 – Representação esquemática do avanço da carbonatação no concreto utilizando fenolftaleína	27
Figura 12 – Penetração dos cloretos no concreto submetido à umidade, dando início a corrosão.....	29
Figura 13 – Representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto.....	30
Figura 14 – Desenvolvimento da RAA no concreto	32
Figura 15 – Fatores necessários para ocorrência da RAA	33
Figura 16 – Fissuras tipo mapa causadas pela RAA	33
Figura 17 – Fissuração causada por RAA orientada na direção da menor restrição quando existe estado de compressão e/ou armação no concreto	34
Figura 18 – Desintegração do concreto por ataque de sulfatos.....	35
Figura 19 – Eflorescência em estrutura de concreto	36
Figura 20 - Caracterização da pesquisa.....	39
Figura 21 – Município de Nova Cruz/RN	40
Figura 22 – Município de Lagoa d’Anta/RN.....	41
Figura 23 – Ponte Regis Bittencourt (Google Earth)	42
Figura 24 – Ponte do Umbuzeiro (Google Earth)	43
Figura 25 – Procedimento metodológico	44
Figura 26 – Vista geral da ponte do Umbuzeiro	45
Figura 27 – Vista geral da ponte Regis Bittencourt	45
Figura 28 – Procedimento para medição da profundidade de carbonatação, a) Limpeza da região estudada, b) Aspersão de fenolftaleína	46
Figura 29 – Exemplificação da medição de abertura de fissuras nos pilares.....	47
Figura 30 – Exemplificação da medição do cobrimento nos pilares	47
Figura 31 – Falhas no sistema de drenagem	50
Figura 32 – Eflorescência, corrosão e deslocamento do concreto.....	50
Figura 33 – Hachura destacando as manifestações patológicas observadas na Figura 32.....	51
Figura 34 – Acúmulo de vegetação e solo sobre a ponte	52
Figura 35 – Deterioração do guarda-corpo e defeitos no revestimento asfáltico	53
Figura 36 – Segregação e fissuração do concreto	54
Figura 37 – Eflorescência, deslocamento e corrosão em estágio avançado	55
Figura 38 – Corrosão em estágio avançado na longarina	55
Figura 39 – Encontro.....	56
Figura 40 – Face inferior da laje do tabuleiro	57
Figura 41 – Comportamento dos pilares após os ensaios com fenolftaleína	58

Figura 42 – Medição de abertura de fissuras nos pilares	59
Figura 43 – Medição do cobrimento do concreto nos pilares.....	60
Figura 44 – Vista geral da ponte Regis Bittencourt	64
Figura 45 – Corrosão do tabuleiro.....	65
Figura 46 – Presença de plantas na face inferior da laje do tabuleiro	66
Figura 47 – Local onde foi presenciado o gotejamento	67
Figura 48 – Eflorescência na transversina da ponte.....	67
Figura 49 – Diferença de cenário encontrada	68
Figura 50 – Manchas escuras encontradas.....	69
Figura 51 – Estribo rompido por corrosão	70
Figura 52 – Comportamento do pilar após o ensaio com fenolftaleína	71
Figura 53 – Medição do cobrimento do concreto em pilar	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	Pontes	14
3.1.1	<i>Elementos estruturais constituintes das pontes</i>	14
3.2	Patologia das estruturas.....	17
3.3	Vida útil e durabilidade	19
3.3.1	<i>Agressividade ambiental</i>	20
3.3.2	<i>Cobrimento das armaduras e limite para abertura de fissuras em serviço</i>	21
3.4	Manifestações patológicas	23
3.4.1	<i>Corrosão de armaduras</i>	23
3.4.1.1	<i>Despassivação por Carbonatação</i>	26
3.4.1.2	<i>Despassivação por cloretos</i>	27
3.4.2	<i>Reação Álcali-Agregado (RAA)</i>	31
3.4.3	<i>Ataque de sulfatos</i>	34
3.4.4	<i>Ataque por águas puras</i>	36
4	METODOLOGIA	38
4.1	Caracterização da pesquisa.....	38
4.2	Caracterização da área de estudo	39
4.2.1	<i>Nova Cruz/RN</i>	39
4.2.2	<i>Lagoa d'Anta/RN</i>	40
4.3	Pontes inspecionadas.....	41
4.3.1	<i>Ponte Regis Bittencourt</i>	41
4.3.2	<i>Ponte do umbuzeiro</i>	42
4.4	Procedimento metodológico adotado.....	43
4.4.1	Inspeção visual e registro fotográfico	44
4.4.2	Medição de profundidade de carbonatação dos pilares.....	45
4.4.3	Medição de abertura de fissuras e do cobrimento do concreto	46
4.4.4	Pesquisa das causas e soluções para as manifestações patológicas ..	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1	Ponte do umbuzeiro (ponte 01)	49

5.1.1	<i>Manifestações patológicas observadas.....</i>	49
5.1.2	<i>Medição da profundidade de carbonatação nos pilares.....</i>	57
5.1.3	<i>Medição de abertura de fissuras em pilares.....</i>	59
5.1.4	<i>Medição do cobrimento do concreto em pilares.....</i>	60
5.1.5	<i>Causas e soluções para as manifestações patológicas observadas</i>	61
5.2	Ponte Regis Bittencourt (ponte 02)	63
5.2.1	<i>Manifestações patológicas observadas.....</i>	63
5.2.2	<i>Medição da profundidade de carbonatação nos pilares.....</i>	70
5.2.3	<i>Medição do cobrimento do concreto</i>	71
5.2.4	<i>Causas e soluções para as manifestações patológicas observadas</i>	72
6	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de transposição de obstáculos naturais é uma questão comum desde os primórdios das civilizações. Esta necessidade atrelada ao desenvolvimento intelectual do ser humano propiciou o surgimento das primeiras pontes, com estrutura bastante rudimentar e baixa capacidade de carga.

As primeiras pontes das quais se tem registro atualmente seriam da Mesopotâmia datadas de 5000 a.C e foram construídas com materiais diretamente extraídos da natureza, como madeira e pedra. Existem também vestígios da ocorrência de pontes na Grécia, na Turquia e no Egito Antigo datados entre 4000 e 2000 a.C. (MENDES *et al.*, 2010, p. 2).

Com a crescente expansão territorial das cidades, decorrente do aumento populacional e do desenvolvimento socioeconômico, muitas vezes, surge a necessidade de construção de pontes visando interligar cidades isoladas por rios e oceanos, unir novos bairros, reduzir distâncias e viabilizar traçados para melhorar a fluidez no trânsito de veículos, entre outras finalidades.

Dentre os diversos tipos de pontes existentes no Brasil, atualmente, as pontes construídas com concreto armado são majoritariamente as mais empregadas. Assim, verifica-se o caráter fundamental de se avaliar os fatores deteriorantes mais comuns que atingem este tipo de obra, visando garantir a segurança necessária e a durabilidade estimada para a mesma.

Comumente, ao se transitar sobre as pontes, apenas o aspecto estético do pavimento e demais elementos visíveis da parte superior são observados, e questões relacionadas à sua conservação ou deterioração não são evidenciadas.

É de suma importância que os elementos estruturais da ponte sejam regularmente inspecionados, com a intenção de determinar seu estado de utilização, sugerir intervenções que mitiguem o avanço de agentes deteriorantes e mantenham os parâmetros de funcionalidade e segurança.

De acordo com Vitório (2006), a inexistência de uma cultura de manutenção, em especial a preventiva, faz com que os órgãos responsáveis pelas obras públicas do Brasil deem ênfase apenas à execução das obras, não se importando com a

conservação das mesmas. Entretanto, com o passar do tempo, essa falta de cuidado propicia o surgimento de diversos tipos de manifestações patológicas em tais obras.

As manifestações patológicas são deteriorações identificadas nas construções, que não comprometem só a aparência, mas também a sua resistência, sendo capaz de levar a ruína parcial ou total do empreendimento. A identificação de uma manifestação patológica deve ser apoiada em um estudo minucioso da estrutura e no conhecimento acerca da origem, consequência e de seus principais agentes causadores.

As duas pontes abordadas neste trabalho são de fundamental importância para a região, bem como para as cidades ao qual fazem parte. A ponte do município de Lagoa d'Anta constitui o único acesso à cidade com pavimento flexível, já a ponte do município de Nova Cruz faz parte do principal caminho pelo lado oeste da cidade, que dá acesso à diversas cidades, bem como ao Campus do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) e ao Polo de Educação a Distância da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Diante disso, observou-se a necessidade de se evidenciar questões relacionadas a manutenção e conservação das pontes, sobretudo pelo caráter fundamental que tais obras representam para a população local e demais que transitam na região.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar as principais manifestações patológicas presentes em duas pontes de concreto armado na microrregião do agreste do Rio Grande do Norte.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar as principais manifestações patológicas observadas nas pontes;
- Investigar as principais causas das manifestações patológicas identificadas;
- Apontar possíveis soluções para as manifestações patológicas observadas.

3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

3.1 Pontes

“Denomina-se Ponte a obra destinada a permitir a transposição de obstáculos à continuidade de uma via de comunicação qualquer.” (MARCHETTI, 2018, p. 1). Os obstáculos citados podem ser: ferrovias, rios, depressões, rodovias, etc. Quando o obstáculo transposto contém água a obra é chamada literalmente de ponte e quando o obstáculo não contém água a ponte é chamada de viaduto.

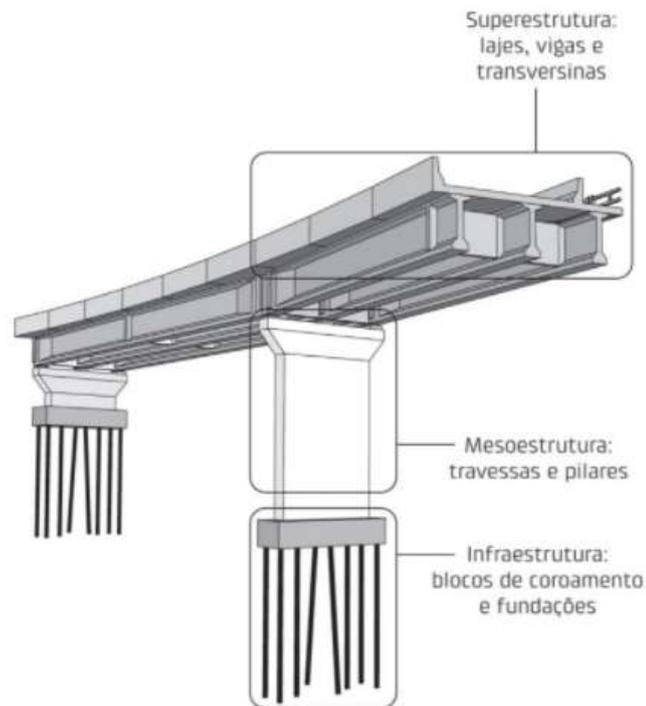
3.1.1 *Elementos estruturais constituintes das pontes*

De acordo com Valeriano (2021), os elementos estruturais que compõem as pontes são:

- Superestrutura: Parte da ponte responsável por suportar o estrado por onde se trafega e transmitir os esforços para a mesoestrutura. A mesma é constituída, basicamente, por vigas e lajes.
- Mesoestrutura: Parte da ponte que recebe as cargas da superestrutura e as transmite para a fundação. Composta por pilares e encontros.
- Infraestrutura: Parte da ponte que recebe as cargas da mesoestrutura e possui a função de transmiti-las para o solo. É composta por diversos tipos de fundação, como: tubulões, blocos de estacas, sapatas, etc.

A Figura 1 exemplifica os elementos constituintes das pontes.

Figura 1 - Elementos constituintes das pontes

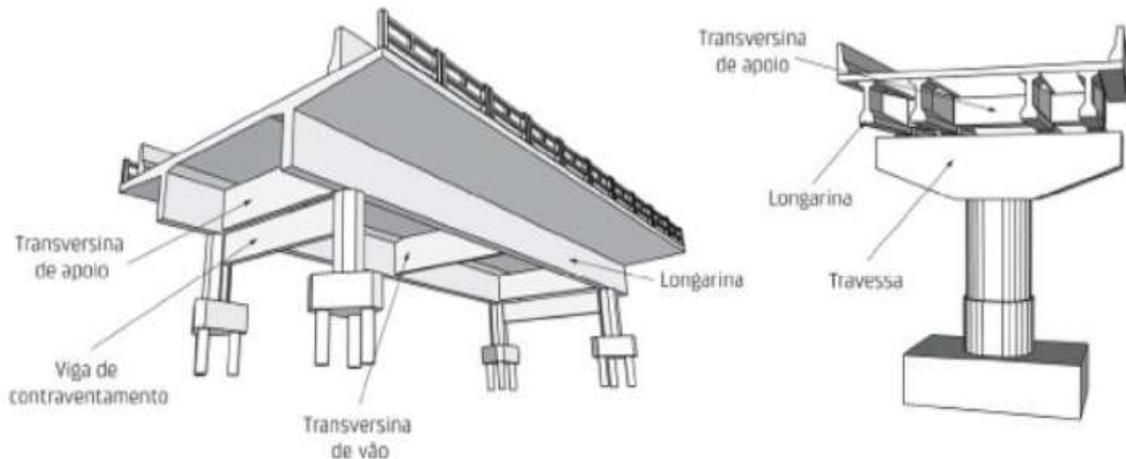


Fonte: VALERIANO, 2021, p. 24.

Valeriano (2021) cita que as vigas que constituem a superestrutura das pontes possuem diferentes tipos de denominações, de acordo com a posição e direção em que estão localizadas, bem como, de acordo com a função que possuem. Os tipos de vigas são:

- Longarinas: vigas longitudinais que recebem diretamente os carregamentos aplicados sobre a laje;
- Transversinas: são vigas transversais às longarinas, podendo ser no apoio ou no vão;
- Travessas: são vigas que são apoiadas sobre os pilares, destinadas a apoiar as longarinas;
- Vigas de contraventamento (ou de travejamento): são vigas utilizadas para unir pilares.

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática dos tipos de vigas que compõem a superestrutura.

Figura 2 - Tipos de vigas

Fonte: VALERIANO, 2021, p. 25.

Existem outros elementos, de caráter secundários, que também constituem as pontes, como:

- Placas de transição: são placas (ou lajes) que fazem a transição (ou aproximação) entre o tabuleiro e a via de acesso à ponte com o objetivo de proporcionar uma transição suave, tendo em vista que a via está sobre a terraplanagem, adensável a longo prazo, e a superestrutura está sobre apoios rígidos;
- Alas e cortinas: são estruturas que servem de suporte para as lajes de transição em pontes que não possuem encontros, na maioria das vezes, age diminuindo os problemas causados por aterros mal compactados;
- Juntas de dilatação: são espaçamentos entre elementos estruturais preenchidos por materiais com alta capacidade de deformação e baixo módulo de elasticidade criados com o objetivo de absorver a variação volumétrica dos materiais.

El Debs e Takeya (2009) citam que a seção transversal de um tabuleiro de pontes, conforme é exposto na Figura 3, pode ser caracterizada com os seguintes elementos:

- Pista de rolamento: é a largura da via que é destinada ao tráfego de veículos, que pode ser dividida em faixas;

- Acostamento: é a largura adicional às faixas de rolamento que é destinada à parada ou estacionamento de veículos em situações de emergência;
- Defesa: é o elemento de segurança anexado na lateral do acostamento que visa proteger os veículos;
- Passeio: é a largura adicional da pista de rolamento reservada exclusivamente ao trânsito de pedestres, podendo ser sinalizada por elemento físico separador ou por pintura;
- Guarda-roda: é o elemento que visa proteger os passeios para pedestres da invasão dos veículos;
- Guarda corpo: é o elemento de proteção a meia altura destinado à resguardar os pedestres.

Figura 3 – Seção transversal de um tabuleiro de pontes e seus elementos



Fonte: CAVALCANTE, 2019, p. 21.

3.2 Patologia das estruturas

De acordo com Sena *et al.* (2020, p. 17):

O termo patologia aqui utilizado no universo das construções é, de fato, uma analogia ao emprego deste mesmo termo na área da saúde, o qual tem sua origem no grego, de uma derivação dos termos *pathos*, que significa sofrimento, doença, e *logos*, significando ciência, estudo. Desta forma, a patologia seria o estudo das doenças de modo geral, representando um estado ou condição anormal cujas causas podem ser conhecidas ou desconhecidas.

A patologia das estruturas é a área da engenharia civil que estuda as origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das manifestações patológicas possíveis de ocorrer nas estruturas (SOUZA e RIPPER, 1998).

As manifestações patológicas são deteriorações identificadas nas construções, as quais podem ser geradas em diferentes fases: execução (por emprego de técnicas construtivas ou materiais inadequados), elaboração do projeto ou ainda adquiridas pelo mau uso da construção ao longo do tempo (SENA *et al.*, 2020).

É importante salientar que os termos “patologia” e “manifestação patológica”, definidos anteriormente, são distintos. Embora, esses termos sejam comumente utilizados como sinônimos de forma errônea, não só por leigos, mas também no meio científico. Outro erro que deve ser ressaltado é o emprego do termo “patologia” no plural, para se referir a mais de uma manifestação patológica.

Segundo Souza e Ripper (1998), o processo de sistematização dos conhecimentos sobre as patologias das estruturas nos últimos tempos, levará a criação de uma classificação dos problemas patológicos em dois segmentos: os simples e os complexos.

As manifestações patológicas simples são aquelas cujo mecanismo de diagnóstico e tratamento são mais evidentes, podendo ser analisadas e resolvidas por meio de padronizações e sem a necessidade de o profissional responsável dispor de conhecimentos profundos sobre o tema.

Já as manifestações patológicas complexas são aquelas cujo diagnóstico e tratamento necessitam de uma análise particularizada e minuciosa, diferenciando daquelas mais convencionais e rotineiras. Para esta situação, é exigido que o profissional técnico possua conhecimentos especializados sobre o tema patologias das estruturas.

3.3 Vida útil e durabilidade

Estudar a origem e as consequências do aparecimento de manifestações patológicas nas estruturas está intimamente atrelado ao estudo de sua durabilidade e vida útil, pois o diagnóstico correto do tipo de manifestação existente é essencial para que a estrutura receba o tratamento apropriado e, conseqüentemente, apresente uma durabilidade e vida útil maior (ZAMODZKI *et al.*, 2019).

Vida útil (VU) de uma estrutura é o período de tempo o qual a estrutura é capaz de assegurar não só a sua estabilidade, mas também todas as atividades para as quais foi projetada (BERTOLINI, 2010). Deve ser levada em conta também na definição de vida útil, a realização de ações de reparo que venham a ser necessárias em situações de danos acidentais, como menciona a NBR 6118 (ABNT, 2014).

A vida útil de projeto (VUP), por sua vez, é uma estimativa teórica de tempo para o qual um sistema é projetado, de modo que se cumpra os requisitos mínimos de desempenho (SENA *et al.*, 2020). De acordo com Bertolini (2010), é frequentemente considerado que a vida útil de projeto de um edifício seja de aproximadamente 50 anos e a de uma ponte em torno de 100 anos.

Para Bertolini (2010), a definição de durabilidade está intimamente relacionada ao conceito de vida útil de projeto (ou expectativa), haja vista que uma estrutura só pode ser considerada durável se sua vida útil for pelo menos igual à vida útil requerida na fase do projeto. Neste sentido, para assegurar o requisito de durabilidade de uma estrutura, o mesmo cita que é necessário que sejam definidos uma série de fatores na fase de projeto, como:

- Condições ambientais em que a estrutura estará exposta, bem como das ações ambientais sobre a mesma;
- Determinar a vida útil de projeto, embora não seja comum explicitar este parâmetro, sendo considerado apenas os valores comumente utilizados, citados anteriormente, para estruturas de concreto armado se estima cerca de 50 anos e 100 anos para estruturas de grande porte, como as pontes;
- Analisar os efeitos do meio ambiente e prever a evolução temporal da degradação sobre os materiais componentes das estruturas;

- Escolher os materiais e projetar a estrutura de forma que a degradação, ao longo do tempo, provocada nos materiais não comprometa a funcionalidade da própria estrutura;
- Formular normas sobre materiais e técnicas executivas visando assegurar que na fase de execução seja cumprido as escolhas da fase de projeto.

Conforme estabelecido na NBR 6118/2014, a durabilidade das estruturas de concreto demanda que haja a contribuição e atitudes coordenadas de todos os envolvidos nas diversas fases da construção, desde o projeto e construção até a utilização, devendo, como mínimo, ser seguido o que estabelece a ABNT NBR 12655, sendo também respeitadas as condições de uso, inspeção e manutenção (ABNT, 2014).

Visando garantir a durabilidade das estruturas de concreto armado, a norma NBR 6118/2014 faz diversas recomendações. Tais recomendações se referem a critérios de projeto que devem ser seguidos tendo como referência a classificação da agressividade do ambiente em relação à estrutura, visando assim, preservar os elementos estruturais e assegurar seu desempenho durante a vida útil de projeto.

3.3.1 Agressividade ambiental

Segundo a norma NBR 6118/2014, a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que agem sobre os elementos de concreto, independente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas (ABNT, 2014).

Conforme o item 6.4.2 da norma NBR 6118:2014, a agressividade ambiental de uma estrutura é classificada de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
	I		Fraca
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a Industrial ^{a, b}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c} Respingos de maré	Elevado

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT, 2014.

É de suma importância que seja determinada a classe de agressividade ambiental (CAA) na fase de concepção da estrutura, pois a mesma influenciará no valor mínimo do cobrimento de armadura e na máxima abertura de fissura permitida.

3.3.2 Cobrimento das armaduras e limite para abertura de fissuras em serviço

Um dos critérios normativos diretamente relacionados à durabilidade diz respeito ao cobrimento das armaduras. A norma NBR 6118/2014 prescreve os valores mínimos de cobrimento em função da classe de agressividade ambiental (CAA) enquadrada, conforme apresenta a Figura 5.

Figura 5 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT, 2014.

Outro critério contido na norma NBR 6118/2014, que se relaciona com a durabilidade, diz respeito ao controle da fissuração dos elementos e proteção das armaduras. De acordo com a norma citada, pode-se fazer o controle da fissuração por meio da limitação da abertura estimada da fissura, em função da classe de agressividade ambiental, conforme apresenta a Figura 6.

Figura 6 – Fissuração em função da classe de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente
^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 3.1). NOTAS 1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2. 2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens. 3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.			

Fonte: ABNT, 2014.

3.4 Manifestações patológicas

3.4.1 Corrosão de armaduras

A corrosão de armaduras é um dos processos de deterioração mais comuns em estruturas de concreto armado. Para que ocorra a corrosão, é necessária uma série de fatores que produzem um ambiente favorável ao seu surgimento, que são: presença de oxigênio, de água, existência de uma diferença de potencial (áreas anódicas e catódicas), um condutor metálico (armadura) e um eletrólito (solução aquosa presente no concreto) (SENA *et al.*, 2020).

A deterioração das barras de aço presentes no concreto é caracterizada pela destruição da camada microscópica impermeável de óxido de ferro, que constitui a chamada película passivadora existente na superfície exterior das barras. A formação dessa camada resulta do impedimento da dissolução do ferro pela elevada

alcalinidade da solução aquosa (pH aproximado entre 12,6 e 14) existente no concreto (SOUZA e RIPPER, 1998).

A deterioração, citada anteriormente, produz uma redução na seção da barra de aço, como podemos observar na Figura 7, ocasionando uma contínua deformação do aço, até que haja a transformação dos aços em ferrugens.

Figura 7 – Perda de seção na barra devido à corrosão eletroquímica



Fonte: Adaptado de EMMONS, 1993 *apud* SANTOS, 2012.

Segundo Novaes e Pznyakov (2021), a formação da ferrugem, basicamente composta pelo Fe_2O_3 , provoca uma expansão da armadura, causando fissurações paralelas às barras corroídas, perda de aderência na ligação estrutural, redução da seção da barra e, a depender do grau de expansão da armadura, o deslocamento da camada superficial do concreto.

Os processos mencionados acima deixam a estrutura cada vez mais sujeita ao ataque dos agentes agressivos e agravam a própria corrosão; como resultado, causam a perda da resistência mecânica da estrutura, bem como reduzem o seu fator de segurança, podendo até a promover o colapso da estrutura, em casos mais graves (NOVAES e POZNYAKOV, 2021).

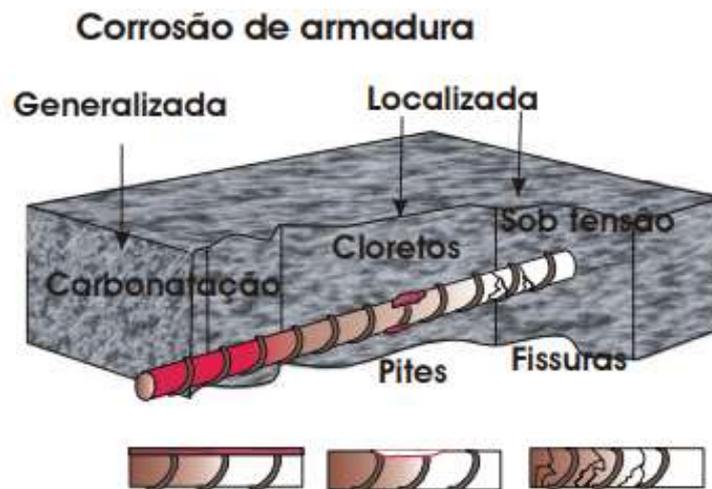
Para Fusco (2008), o processo de corrosão das armaduras no concreto só poderá ocorrer caso a película passivadora seja destruída.

Segundo Sena *et al.* (2020), o principal mecanismo de corrosão do aço no concreto acontece por meio eletroquímico (corrosão aquosa), podendo ser do tipo localizada (conhecida por pites ou cavidades), que geralmente ocorre em ambientes em contato com os íons agressivos (cloretos, em especial) e sua formação se torna favorável quando existe umidade e presença de oxigênio; ou do tipo generalizada, decorrente da carbonatação que provoca a redução do pH do concreto para valores menores do que 9.

Um outro tipo de corrosão, citado por Souza e Ripper (1998, p.66) é a corrosão por tensão flutuante, que ocorre em “aços que são submetidos a grandes esforços mecânicos (protensão) e que, em presença de meio agressivo, podem sofrer fratura frágil, resultando na perda de condição para a sua utilização”.

Na Figura 8 são apresentados os mecanismos de corrosão do aço no concreto.

Figura 8 – Mecanismo de corrosão do aço no concreto



Fonte: Cascudo (1997) *apud* Polito (2006).

Na Figura 9, Husni (2003) mostra uma representação esquemática das fissuras paralelas à barra corroída observadas em vigas de concreto armado afetadas pela corrosão, o mesmo ainda associa o grau de fissuração ao % de variação de volume apresentado pelo aço, representado por Δ .

Figura 9 – Representação esquemática das fissuras por corrosão



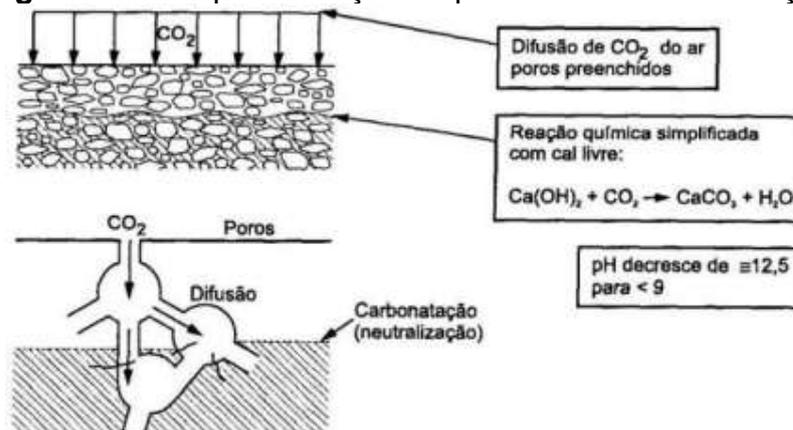
Fonte: HUSNI, 2003, p.46.

De acordo com o que foi apresentado, percebe-se que é de suma importância não permitir que a corrosão se inicie, pois à medida que o tempo passa a intensidade do processo vai aumentando cada vez mais.

3.4.1.1 Despassivação por Carbonatação

A carbonatação é o resultado da reação do dióxido de carbono atmosférico (CO_2), que penetra por difusão nos poros do concreto, com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no cimento hidratado, dando origem ao carbonato de cálcio (CaCO_3). Como resultado, o pH do concreto cai para valores abaixo de 9, removendo a proteção alcalina que o mesmo exerce sobre a armadura, como podemos observar na Figura 10. A corrosão localizada da armadura inicia-se quando a frente de carbonatação consegue penetrar em todo o cobrimento de concreto e atingir a armadura, despassivando-a (SENA *et al.*, 2020).

Figura 10 – Esquemática do processo de carbonatação



Fonte: BAKKER (1988) adaptado por CASCUDO (2005).

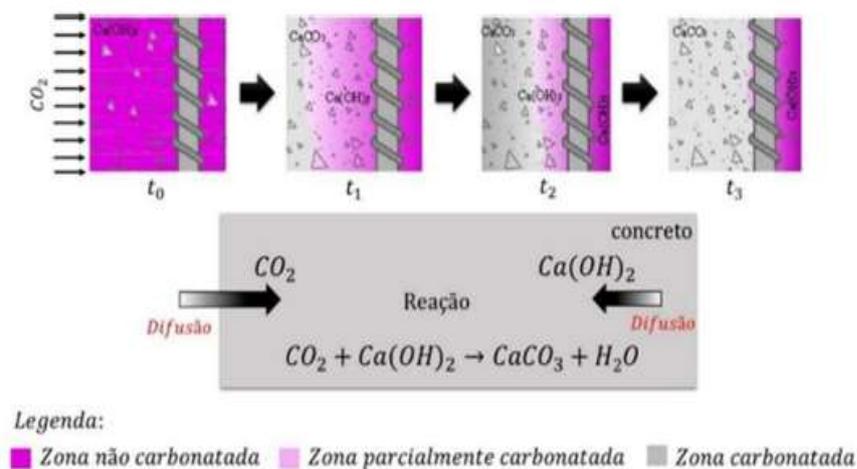
A partir do que foi apresentado da Figura 10, nota-se que quanto maior a quantidade de poros ou fissuras que existirem na estrutura, maior também será a incidência de CO_2 , o que favorece a carbonatação e, conseqüentemente, a corrosão. Desta forma, o aumento da carbonatação está diretamente associado à facilidade de penetração do CO_2 nas estruturas por meio da sua camada de cobrimento.

Na atualidade, há uma série de ensaios utilizados para determinar a profundidade de carbonatação, como: a difração de raio-X, análise térmica diferencial,

espectroscopia por infravermelho, termogravimetria, dentre outros. Porém, o ensaio mais utilizado é o que envolve a utilização de indicadores ácido/base, ou seja, que levam em consideração o pH. Este ensaio é o mais utilizado devido ao baixo custo e a facilidade de execução, sendo a solução de fenolftaleína a mais empregada para verificação da carbonatação (TASCA, 2012).

Ao aplicar a fenolftaleína no concreto, verifica-se que as partes não carbonatadas apresentam coloração rosa, em contrapartida as regiões carbonatadas não apresentam alteração na coloração, como é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática do avanço da carbonatação no concreto utilizando fenolftaleína



Fonte: POSSAN, 2010.

3.4.1.2 Despassivação por cloretos

A presença de íons cloreto (Cl⁻) em quantidades significativas é capaz de provocar o rompimento da película de óxidos passivantes do aço, até mesmo em um meio com alto pH, como é o concreto não carbonatado (SENA *et al.*, 2020).

Dessa forma, os riscos do surgimento da corrosão aumentam e são ainda mais sérios quando estão presentes no meio íons despassivantes (FREIRE, 2005). No entanto, o efeito mais nocivo dos cloretos, segundo Sena *et al.* (2020), é relacionado ao fato de que durante as reações existe a liberação final de íons cloretos, que mais uma vez ficam livres para poderem reagir com o ferro presente na armadura.

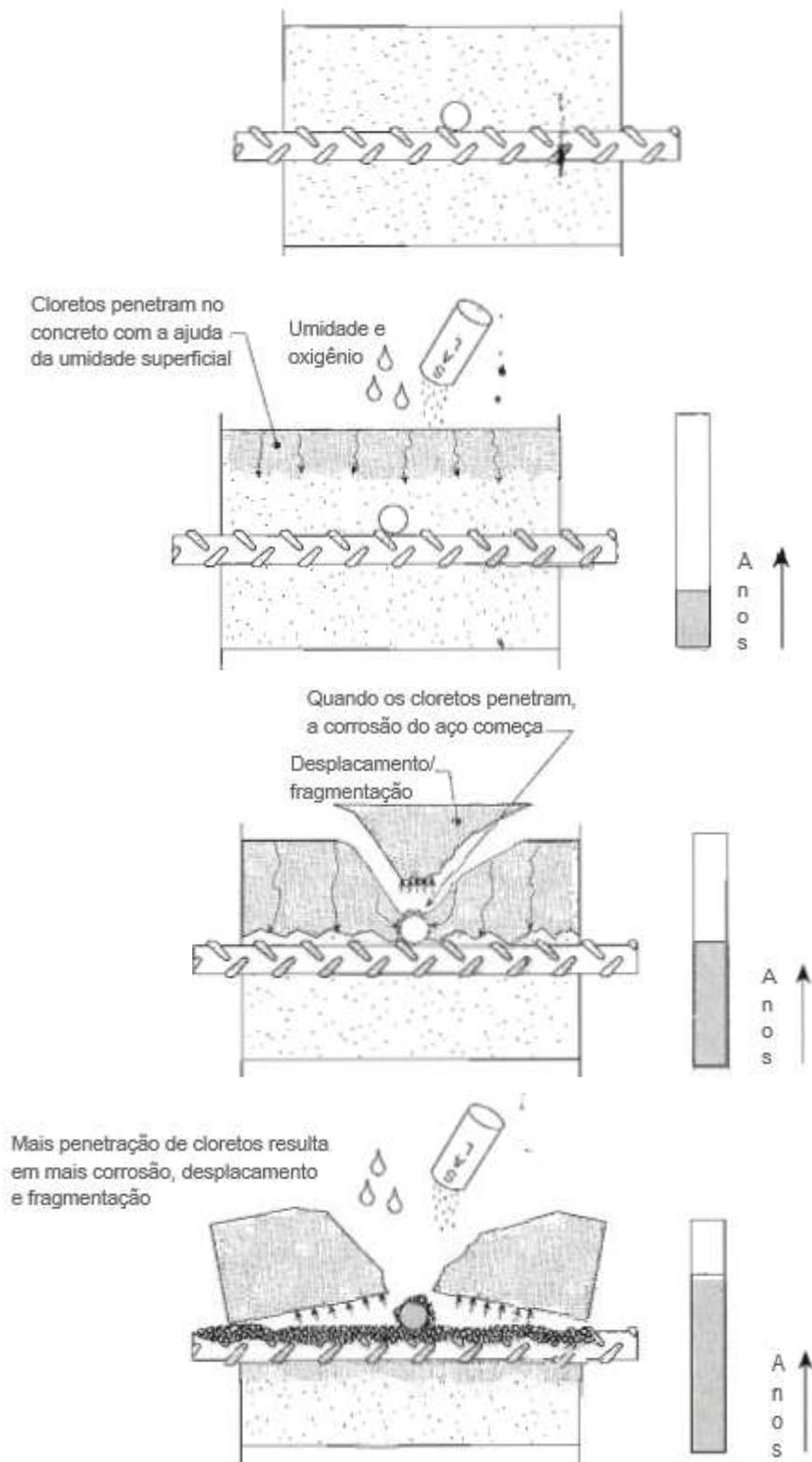
A introdução do cloreto na mistura do concreto pode ser decorrente do uso acidental de agregados contaminados, de água do mar, de água salobra ou pelo uso de aditivos que contêm cloretos. Nenhum desses materiais deve ser permitido na composição do concreto armado, e as normas, em geral, prescrevem limites rigorosos em relação ao teor de cloreto no concreto proveniente de qualquer fonte (NEVILLE, 2016).

De acordo com Freire (2005), além desse tipo de contaminação, durante a mistura, ainda pode ocorrer a contaminação em serviço, onde os íons cloreto que advêm de fontes externas podem se aproveitar da estrutura porosa do concreto e atingir a armadura em um período de tempo muito mais curto que o correspondente à vida estimada para a estrutura.

O transporte de contaminantes, como o cloreto, para o interior do concreto, está diretamente associado com a porosidade da pasta de cimento endurecida. Assim, o cuidado com o cobrimento das armaduras e o controle da fissuração são fundamentais para minimizar este efeito, para isso a NBR 6118/2014 indica a utilização de cimento composto com adição de escória ou material pozolânico e também que seja utilizado um concreto com baixa porosidade.

A Figura 12 apresenta um esquema de penetração dos cloretos no concreto submetido à umidade, o início da corrosão e o conseqüente deslocamento.

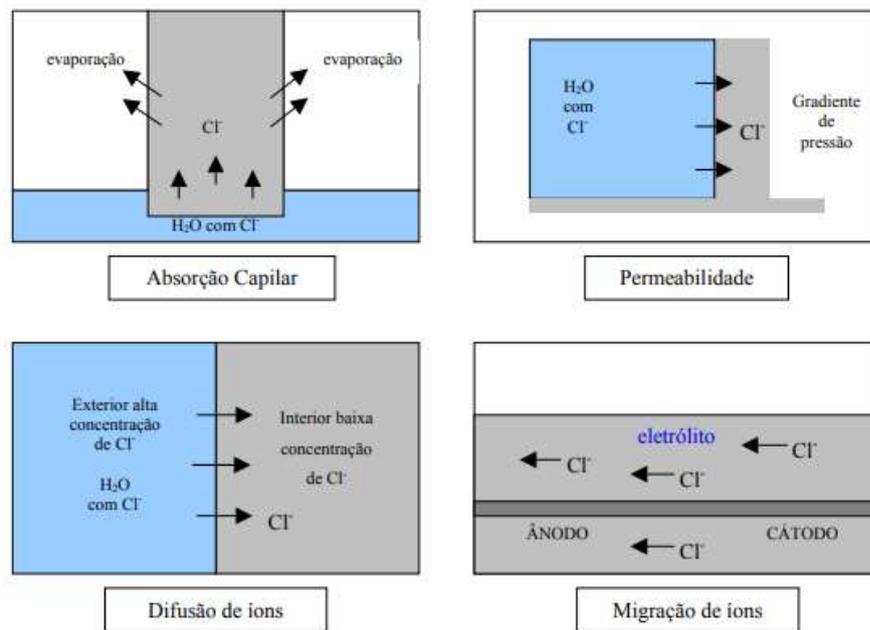
Figura 12 – Penetração dos cloretos no concreto submetido à umidade, dando início a corrosão



Fonte: Adaptado de EMMONS, 1994.

Na literatura são comumente citados quatro mecanismos de penetração pelos quais ocorre o transporte de íons de cloro no interior do concreto, são eles: absorção capilar, difusão, migração e permeabilidade. Na Figura 13 são apresentados os quatro mecanismos de penetração citados.

Figura 13 – Representação esquemática dos mecanismos de transporte de íons cloreto no concreto



Fonte: Helene (1993) *apud* Hoffmann (2001).

- **Absorção** - É um mecanismo que ocorre em estruturas porosas, como é o caso do concreto. O mesmo corresponde ao fenômeno em que o concreto absorve a água contaminada com cloretos que está em contato com a sua superfície por tensão capilar, ou seja, é um fenômeno que se resume a ação de forças de atração dos poros da estrutura sobre os líquidos que estão em contato com sua superfície (VITALI, 2013).

De acordo com Mota (2012), o mecanismo em questão, em geral, é o primeiro passo para a entrada de íons cloreto na superfície da estrutura de concreto. O mesmo ainda cita que quanto menores forem os poros conectados do concreto, mais intensas serão as forças capilares de sucção.

- **Difusão** - Para Vitali (2013), a difusão é um processo de transporte de massa que ocorre de forma espontânea, causada exclusivamente por gradientes de

concentração iônica, onde os cloretos presentes em regiões de maior concentração (próximo à superfície) se deslocam para regiões de concentração inferior (mais interna).

- Migração - Esse mecanismo consiste na movimentação de espécies iônicas em que a força motriz é uma diferença de potencial causada pela presença de dois eletrodos, um positivo em um negativo, de modo que os íons se movem ao eletrodo com carga de sinal oposto. O deslocamento dos íons por migração pode permitir o escoamento de íons de regiões de maior concentração para regiões de menor concentração, acompanhando o fluxo de difusão (KROPP, 1995, apud VITALI, 2013).
- Permeabilidade - Denomina-se de permeabilidade, o fluxo através de um meio poroso, já a permeabilidade do concreto é a facilidade com que os fluidos, sejam eles líquidos ou gases, podem adentrar e se mover no interior do concreto, sendo essa movimentação causada pela diferença de pressão existente entre os poros do concreto (NEVILLE, 2016).

A identificação da existência de íons cloreto no concreto, bem como de sua profundidade pode ser realizada através da aspersão de uma solução com nitrato de prata sobre a estrutura. A comprovação da presença de cloretos no concreto se dá pela formação de áreas esbranquiçadas no local de aplicação (SENA *et al.*, 2020).

Em regiões com classe de agressividade III ou IV, onde existe o contato com o ambiente marinho, a proximidade do mar faz com que a atmosfera contenha partículas de água com sais dissolvidos que são arrastados pelo vento e podem se depositar nas estruturas, propiciando a penetração do cloreto por absorção ou difusão (MISSAU, 2004).

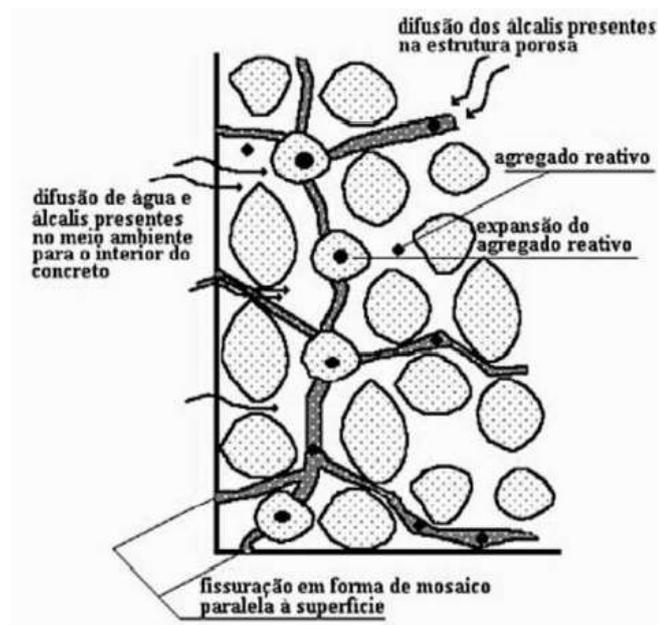
3.4.2 Reação Álcali-Agregado (RAA)

A reação álcali-agregado (RAA) é uma manifestação patológica que pode provocar a degradação do concreto, interferindo diretamente na durabilidade das estruturas. As pontes de concreto são exemplos de estruturas que estão mais suscetíveis à ocorrência desse tipo de reação, devido estarem localizadas em ambientes de elevada umidade.

Define-se RAA como uma reação química que ocorre no concreto endurecido entre alguns minerais reativos dos agregados e os álcalis do cimento. Essa reação produz um gel expansivo na envoltória do agregado, quando na presença de água, age produzindo tensões internas de tração na massa do concreto, que por sua vez provocam o surgimento de fissuras e reduz sua resistência.

Na Figura 14 é apresentado o esquema de desenvolvimento da reação álcali-agregado no concreto.

Figura 14 – Desenvolvimento da RAA no concreto



Fonte: Souza e Ripper (1998).

Para que a reatividade ocorra, faz-se necessária a presença de três principais agentes condicionantes, ver Figura 15:

- Álcalis (mais frequentemente oriundo do cimento da mistura do concreto);
- Agregado reativo;
- Presença constante de umidade.

Figura 15 – Fatores necessários para ocorrência da RAA



Fonte: SANCHEZ (2008).

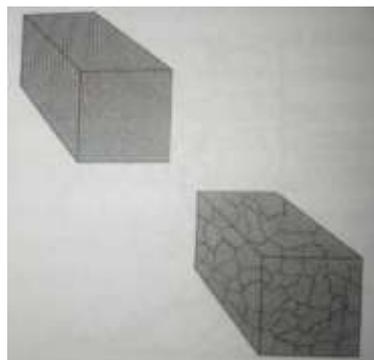
A RAA pode ser dividida em:

- Reação álcali-sílica (RAS)
- Reação álcali-silicato (RAS)
- Reação álcali-carbonato (RAC)

Atualmente, não existem registros conhecidos de casos de reação álcali-carbonato no Brasil. Assim, é de costume se utilizar o termo RAA (genérico) para se referir à RAS.

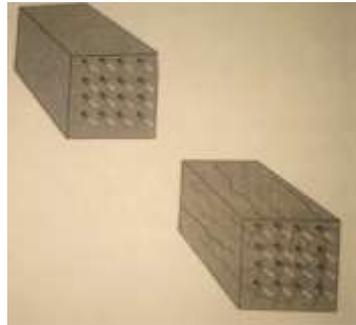
De acordo com Sena *et al.* (2020), existem duas configurações principais que as fissuras causadas pela reação álcali-agregado assumem, são elas: fissuração com orientação alternada, possui formato de um mapa e ocorre quando a restrição à expansão é baixa ou nula; e fissuração orientada na direção de menor restrição que ocorre quando existe um estado de compressão e/ou armação no concreto. Nas Figuras 16 e 17 são apresentadas as duas configurações citadas e suas diferenças.

Figura 16 – Fissuras tipo mapa causadas pela RAA



Fonte: Andrade (2016) *apud* Sena *et al.* (2020).

Figura 17 – Fissuração causada por RAA orientada na direção da menor restrição quando existe estado de compressão e/ou armação no concreto



Fonte: Andrade (2016) *apud* Sena *et al.* (2020).

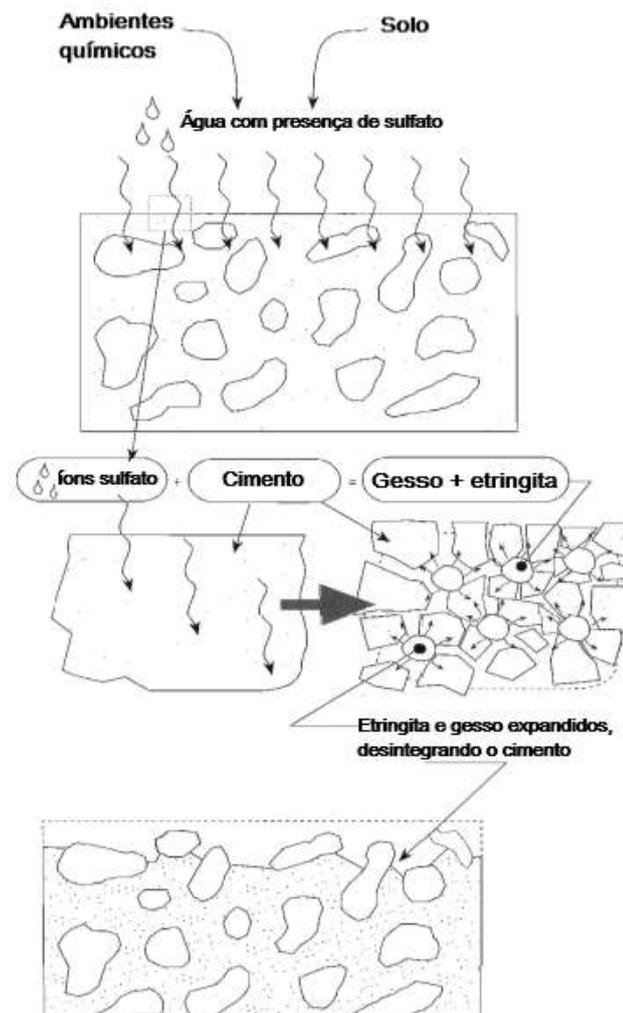
Segundo Souza e Ripper (1998), a adição de pozolanas, em quantidades adequadas, pode inibir ou até mesmo evitar a RAA. É de fundamental importância também que na fase de projeto o projetista especifique cimentos com baixo teor de álcalis, agregados não reativos e limite o teor de umidade.

3.4.3 Ataque de sulfatos

Os íons sulfatos são caracterizados como um dos agentes que podem apresentar uma maior agressividade ao concreto. Os mesmos podem ter origem nos materiais que constituem o concreto, como na água de amassamento, nos agregados ou no cimento, bem como pelo contato do concreto com solos ou águas contaminadas com este agente nocivo. A agressividade dos sulfatos decorre de sua ação expansiva, que pode provocar tensões capazes de fissurar a estrutura (SILVA, 1998).

De acordo com Costa (2004), basicamente, são duas as formas em que o sulfato ataca o concreto: (1) reação com os produtos de hidratação da alumina e/ou aluminato tricálcico não hidratado, produzindo etringita e (2) reação com o hidróxido de cálcio produzindo gesso. Na Figura 18 é apresentado o esquema de desintegração do concreto por ataque de sulfatos.

Figura 18 – Desintegração do concreto por ataque de sulfatos



Fonte: Adaptado de EMMONS, 1994.

O concreto adquire externamente uma coloração esbranquiçada logo após ser atacado pelo sulfato, na sequência, pode apresentar fissuração externa e/ou até mesmo deslocamento, com perda de resistência à compressão, devido a formação de compostos expansivos em seu interior (COSTA, 2004).

Para Aguiar (2006), todos os sulfatos podem ser nocivos ao concreto, ao reagir com a pasta de cimento hidratado. Durante o ataque, os íons sulfato reagem principalmente com hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e aluminato tricálcico, C_3A , para produzir etringita e gesso. Essa formação se expande, aplicando pressão e desagregando a pasta de cimento.

3.4.4 Ataque por águas puras

As águas que não possuem sais dissolvidos, chamadas de águas quimicamente puras, têm uma maior tendência de agredir o concreto, deixando-o mais poroso e em consequência disso menos resistente. Como exemplo de águas quimicamente puras, temos a água da chuva (exceto a chuva ácida) e a água de poços em regiões silicosas (SOUZA e RIPPER, 1998).

A agressividade das águas puras é função direta da velocidade, da quantidade de água que atua sobre o concreto e do seu tempo de permanência (águas empoçadas). A evidência mais comum desta ação é a dissolução do hidróxido de cálcio, seguida de precipitação de géis, com consequente formação de estalactites e estalagmites (SOUZA e RIPPER, 1998, p. 54).

Causada pelo contato da estrutura de concreto com águas puras, ácidas, carbônico agressivas e outras, a lixiviação é o processo de dissolução e arraste do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 presente na pasta de cimento endurecido em direção à superfície externa da estrutura. Este processo ocorre através da percolação de água pelo interior do concreto, formando eflorescências e estalactites em sua superfície. As eflorescências, como representado na Figura 19, são manchas brancas que se formam na superfície das estruturas de concreto, decorrentes do processo de lixiviação e dissolução de produtos solúveis (SENA *et al.*, 2020).

Figura 19 – Eflorescência em estrutura de concreto



Fonte: ecivilnet.com, 2016.

No início, aparenta ser apenas um problema estético, no entanto, a remoção dos componentes hidratados da pasta de cimento (íons cálcio) provoca uma redução na alcalinidade da estrutura, já que o hidróxido de cálcio é o composto hidratado do cimento responsável por manter o pH do concreto básico e, conseqüentemente, por conferir proteção às armaduras frente aos agentes corrosivos. Além do mais, a remoção desses componentes hidratados da pasta de cimento torna o concreto mais poroso, propiciando a entrada de agentes nocivos à estrutura (SENA *et al.*, 2020).

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização da pesquisa

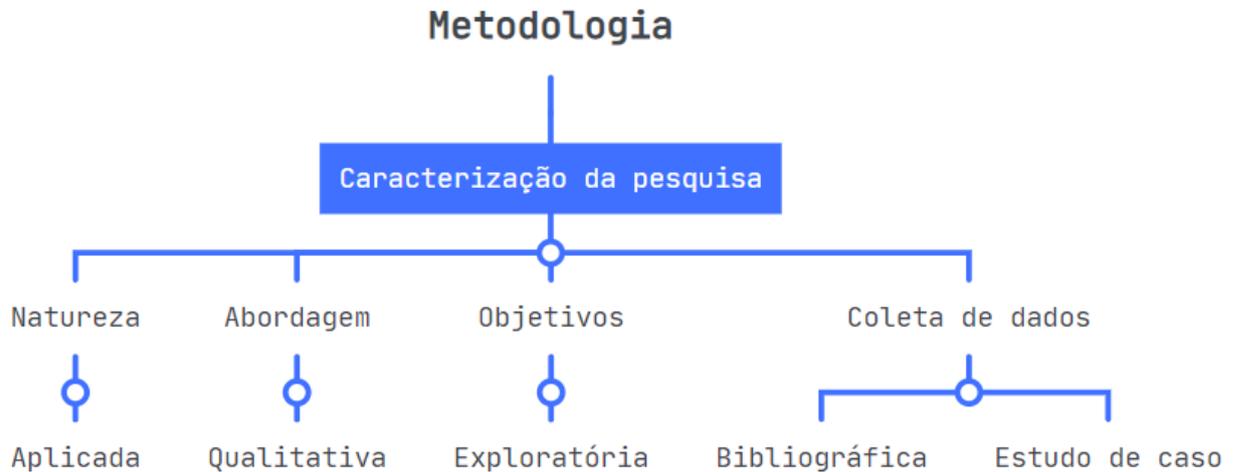
A pesquisa científica classifica-se quanto à natureza, à abordagem metodológica, quanto aos objetivos e quanto à coleta de informações (COSTA, 2020). Utilizando a abordagem feita por Gil (2008), em relação a classificação quanto à natureza, a presente pesquisa é classificada como aplicada, haja vista que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.

Do ponto de vista da forma de abordagem da pesquisa, este trabalho é classificado como uma pesquisa qualitativa, por envolver a obtenção de dados descritivos, obtidos pelo contato direto entre o pesquisador e a situação estudada (OLIVEIRA, 2011).

No que se refere aos objetivos, a pesquisa é do tipo exploratória. Já que objetiva proporcionar uma maior familiaridade ao problema, com vistas a torná-lo mais explícito (GIL, 2008).

Já quanto aos procedimentos técnicos para a coleta de dados, utilizou-se da pesquisa bibliográfica e também do estudo de caso. Bibliográfica, por ter sido fundamentada com base em material já elaborado como livros, artigos científicos e teses. Pesquisa como estudo de caso, pois foi realizado a análise das manifestações patológicas considerando o estudo de caso em duas pontes de concreto armado (GIL, 2008).

A pesquisa foi caracterizada conforme o fluxograma metodológico ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Caracterização da pesquisa

Fonte: Própria Aatoria, 2022.

4.2 Caracterização da área de estudo

4.2.1 Nova Cruz/RN

O município de Nova Cruz/RN, Figura 21, está situado na mesorregião Agreste Potiguar e na microrregião Agreste Potiguar, possuindo como limitantes os municípios de Santo Antônio/RN, Várzea/RN, Montanhas/RN, Pedro Velho/RN, Lagoa d'Anta/RN, Passa e Fica/RN e com o Estado da Paraíba. A sede do município tem uma altitude média de 73 metros e possui as seguintes coordenadas 06° 28' 40,8" de latitude sul e 35° 26' 02,4" de longitude oeste, situando-se a cerca de 114 km da capital Natal/RN (CPRM, 2005).

De acordo com o censo de 2010 do IBGE, último censo divulgado até a presente data, a população do município era de 35 490 habitantes. Ainda de acordo com dados presentes no site do IBGE, a cidade possui uma área de cerca de 277,658 km², e sua densidade demográfica é de 127,82 hab/km².

Quanto aos aspectos fisiográficos, o município de Nova Cruz/RN apresenta um clima muito quente e semiárido, com estação chuvosa atrasando-se para o outono. O período chuvoso, por sua vez, ocorre de fevereiro a maio, com umidade relativa média anual de 65% (CPRM, 2005).

Figura 21 – Município de Nova Cruz/RN



Fonte: Wikipédia, 2022.

4.2.2 Lagoa d'Anta/RN

O município de Lagoa d'Anta/RN, Figura 22, está situado na mesorregião Agreste Potiguar e na microrregião Agreste Potiguar, possuindo como limitantes os municípios de Santo Antônio/RN, São José do Campestre/RN, Passa e Fica/RN, Nova Cruz/RN e Serra de São Bento/RN. A sede do município tem uma altitude média de 154 metros e possui as seguintes coordenadas 06° 23' 27,6" de latitude sul e 35° 35' 52,8" de longitude oeste, situando-se a cerca de 121 km da capital Natal/RN (CPRM, 2005).

De acordo com o censo de 2010 do IBGE, último censo divulgado até a presente data, a população do município era de 6 227 habitantes. Ainda de acordo com dados presentes no site do IBGE, a cidade possui uma área de cerca de 105,652 km², e sua densidade demográfica é de 58,94 hab/km².

Quanto aos aspectos fisiográficos, o município de Lagoa d'Anta/RN apresenta um clima muito quente e semiárido, com estação chuvosa atrasando-se para o outono. O período chuvoso, por sua vez, ocorre de março a julho, com precipitação pluviométrica anual observada de 773,00 mm e com umidade relativa média anual de 73% (CPRM, 2005).

Figura 22 – Município de Lagoa d’Anta/RN



Fonte: Wikipédia, 2022.

4.3 Pontes inspecionadas

4.3.1 *Ponte Regis Bittencourt*

Na Figura 23 é apresentada a ponte Regis Bittencourt, localizada sobre o Rio Curimataú, é o principal acesso a cidade de Nova Cruz pela porção oeste do município, via RN-120 e RN-269. A mesma é responsável por interligar Nova Cruz/RN aos municípios de Santo Antônio/RN, Passa e Fica/RN e Lagoa d’Anta/RN.

A referida ponte foi construída pela Construtora Riograndense LTDA e inaugurada em 1952 pelo governador Sílvio Piza Pedroza, em homenagem ao engenheiro Regis Bittencourt.

Quanto às manutenções e reparos, a ponte passou apenas por reparos na parte superior, como a revitalização do pavimento e do guarda corpo, não apresentando indícios de reparos na parte estrutural.

Conforme a norma NBR 6118:2014, o local onde a ponte foi construída pode ser classificado como Classe de Agressividade Ambiental Urbana (CAA II), apresentando assim, agressividade moderada e risco pequeno de deterioração da estrutura.

Por ser o principal caminho pelo lado oeste da cidade, que dá acesso à diversas cidades, bem como ao Campus do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) e ao Polo de Educação a Distância da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), verifica-se que existe um alto volume de tráfego pelo qual a ponte é exposta.

Figura 23 – Ponte Regis Bittencourt (Google Earth)



Fonte: Google Earth (2022), adaptado pelo autor.

4.3.2 Ponte do umbuzeiro

Na Figura 24 é apresentada a ponte do município de Lagoa d'Anta/RN, conhecida popularmente como “ponte do Umbuzeiro”, localiza-se na RN-001, entroncamento RN-093/Lagoa d'Anta, mais precisamente no Sítio Umbuzeiro. A mesma é responsável por interligar Lagoa d'Anta/RN aos municípios de São José do Campestre, Santo Antônio/RN e Passa e Fica/RN.

Quanto às manutenções e reparos, a ponte não passou por nenhum processo que se tenha conhecimento, apenas a revitalização do pavimento que ocorre quando tem algum tipo de reparo na RN-001.

Em função do ambiente em que a ponte está inserida, com exposição constante ao CO₂ emitido pelos automóveis, a classe de agressividade considerada foi a CAA II. Com isso, considera-se que a estrutura apresenta agressividade moderada e risco pequeno de deterioração.

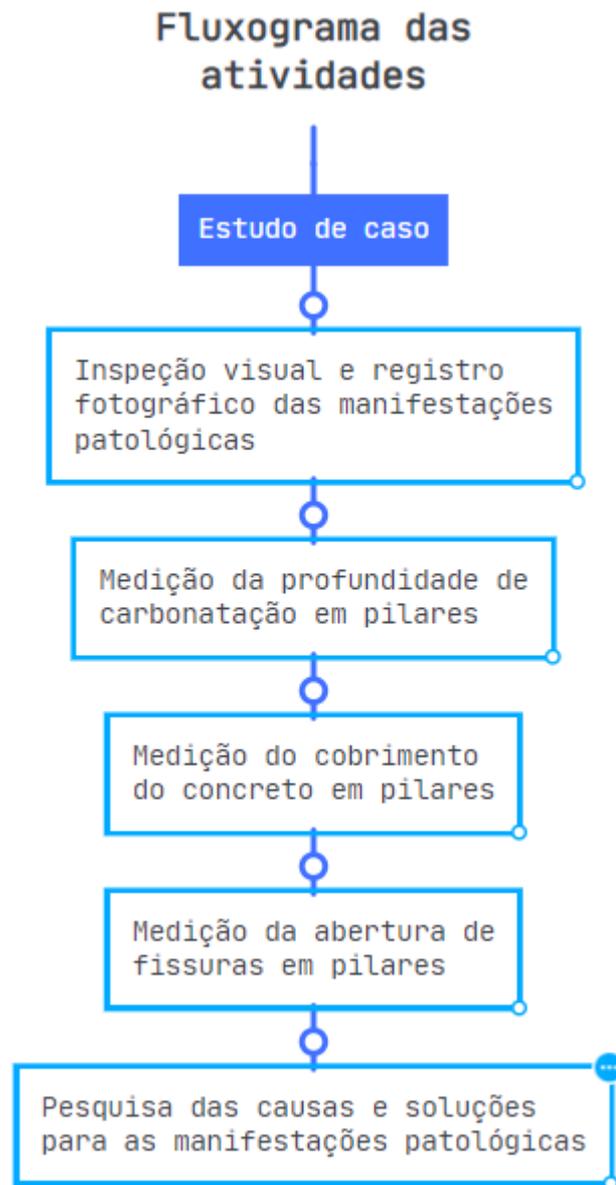
Figura 24 – Ponte do Umbuzeiro (Google Earth)



Fonte: Google Earth (2022), adaptado pelo autor.

4.4 Procedimento metodológico adotado

O procedimento metodológico adotado nesta pesquisa seguiu as etapas ilustradas na Figura 25.

Figura 25 – Procedimento metodológico

Fonte: Própria Aatoria, 2022.

4.4.1 Inspeção visual e registro fotográfico

Inicialmente, foram realizadas visitas aos locais onde as pontes ficam localizadas, onde foram feitas inspeções visuais e registro fotográfico das manifestações patológicas identificadas.

Para a inspeção visual foram selecionados diversos elementos da ponte do Umbuzeiro, situada no município de Lagoa d'Anta/RN e da ponte Regis Bittencourt,

situada no município de Nova Cruz/RN, que apresentavam manifestações patológicas. As pontes estudadas estão presentes nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Vista geral da ponte do Umbuzeiro



Fonte: Própria Aatoria, 2022.

Figura 27 – Vista geral da ponte Regis Bittencourt



Fonte: Própria Aatoria, 2022.

4.4.2 Medição de profundidade de carbonatação dos pilares

Para a realização da medição de profundidade de carbonatação foram selecionados pilares com fissuras e outros com armadura aparente. Inicialmente, a

armadura e a área de concreto em volta da armadura foram limpas e, na sequência, foram aspergidas a fenolftaleína, conforme apresenta a Figura 28.

Figura 28 – Procedimento para medição da profundidade de carbonatação, a) Limpeza da região estudada, b) Aspersão de fenolftaleína



Fonte: Própria Aatoria, 2022.

Em uma única situação, onde o pilar apresentava fissura e o concreto apresentava início de deslocamento, foi retirado um pequeno pedaço do revestimento e, em seguida, foi realizado o mesmo procedimento de limpeza e aspersão de fenolftaleína.

4.4.3 Medição de abertura de fissuras e do revestimento do concreto

Para a realização da medição de abertura de fissuras foram utilizadas uma régua e uma trena, com o objetivo de medir a espessura da fissura, e assim, poder compará-la com os limites normativos permitidos. A Figura 29 exemplifica o procedimento adotado.

Figura 29 – Exemplificação da medição de abertura de fissuras nos pilares



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Para a realização da medição do cobrimento do concreto foi utilizada uma trena, com o objetivo de medir a espessura da camada de cobrimento do concreto em pilares, e assim, verificar se a mesma estava de acordo com a classe de agressividade ambiental enquadrada. A Figura 30 exemplifica o procedimento adotado.

Figura 30 – Exemplificação da medição do cobrimento nos pilares



Fonte: Própria Autoria, 2022.

A medição do cobrimento foi realizada apenas nos pilares com armadura aparente. Não foi possível realizar a medição do cobrimento do concreto em vigas e laje, em função da dificuldade de acesso a esses elementos.

4.4.4 Pesquisa das causas e soluções para as manifestações patológicas

Nesta etapa, foram investigadas as possíveis causas de ocorrência das manifestações patológicas encontradas nas duas pontes abordadas e, em seguida, foram sugeridas soluções a serem tomadas para a resolução desses problemas.

Os resultados das etapas mencionadas anteriormente são apresentados no tópico 5 deste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As visitas à ponte do Umbuzeiro, situada no município de Lagoa d'Anta/RN e à ponte Regis Bittencourt, situada no município de Nova Cruz/RN, possibilitaram verificar a presença de diversas manifestações patológicas, desenvolvidas principalmente como consequência da falta de manutenção preventiva no decorrer de sua vida útil. Dentre os problemas observados estão a eflorescência, carbonatação, falhas no sistema de drenagem e no pavimento asfáltico, bem como a presença de corrosão em diferentes partes da ponte.

A presença das manifestações patológicas citadas anteriormente pode prejudicar o desempenho estrutural das pontes, fazendo com que sejam necessárias intervenções para garantir a segurança estrutural e o alcance do tempo máximo estimado para sua vida útil.

Para uma melhor organização, os resultados obtidos foram separados em dois tópicos, de acordo com a ponte analisada.

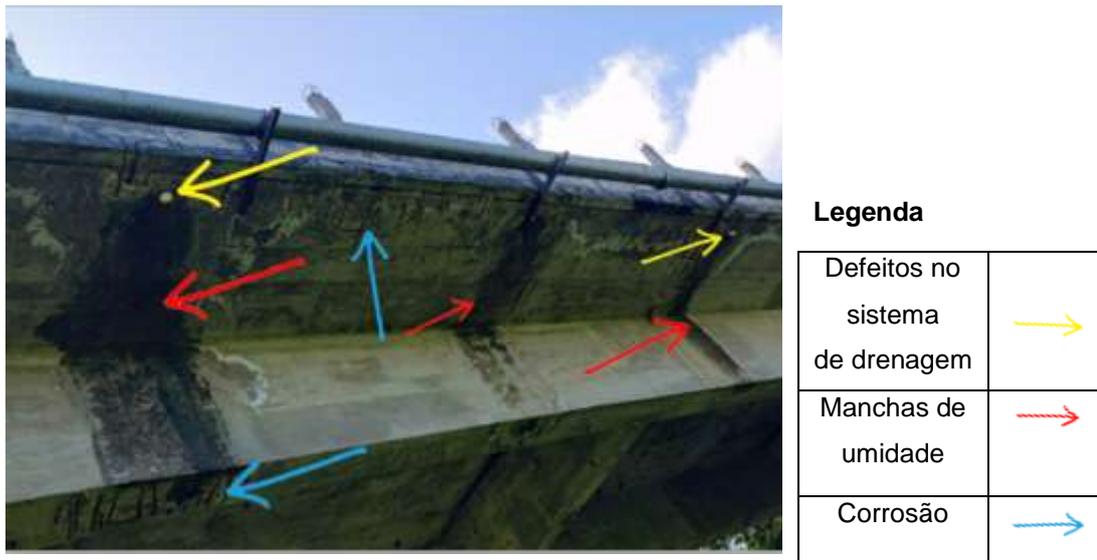
5.1 Ponte do umbuzeiro (ponte 01)

5.1.1 *Manifestações patológicas observadas*

A obra de arte especial abordada, apresenta-se em estado considerável de deterioração, com destaque para as fissuras em alguns pilares, a presença de uma grande quantidade de manchas ocasionadas pela eflorescência, corrosão e deslocamento do concreto, em especial nos pilares e longarinas.

A Figura 31 apresenta as falhas de execução observadas em alguns pontos do sistema de drenagem, onde verifica-se a presença de pedaços de tubos cortados rentes a laje do tabuleiro, fazendo com que a água drenada da parte superior da ponte escoe pela face inferior da laje e pela face lateral da longarina. Em consequência do fato exposto, surge uma mancha de umidade que propicia o aparecimento de diferentes manifestações patológicas, como a corrosão.

Figura 31 – Falhas no sistema de drenagem



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Na ponte também foi verificado a presença de diversas manchas brancas que indicam o fenômeno da eflorescência, conforme apresentado na Figura 32 e em destaque com a hachura amarela na Figura 33.

Figura 32 – Eflorescência, corrosão e deslocamento do concreto



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Figura 33 – Hachura destacando as manifestações patológicas observadas na Figura 32



Fonte: Própria Autoria, 2022.

A eflorescência, conforme mencionado anteriormente, ocorre na estrutura em razão do processo da lixiviação, que por sua vez é causado pela infiltração de águas de diversos tipos, inclusive as puras, que provocam a dissolução e arraste de sais solúveis presentes na pasta de cimento endurecido em direção à superfície externa da estrutura.

A expulsão dos componentes hidratados da pasta de cimento provoca uma redução na alcalinidade da estrutura, fazendo com que as armaduras percam a proteção contra os agentes corrosivos, como consequência do processo de despassivação da armadura, já se verifica a corrosão e o deslocamento do concreto, conforme pode ser visualizado na Figura 32 e em destaque com a hachura vermelha na Figura 33.

Tentando resolver o problema da eflorescência, e por entender que é apenas um problema estético, em algumas situações a região afetada é apenas higienizada superficialmente, porém a única forma de solucioná-lo é eliminando a fonte de água, haja vista que se existe eflorescência significa que aquela região apresenta umidade.

A Figura 34, apresenta a vista superior da ponte onde é possível notar o acúmulo de vegetação e solo sobre a ponte, o que acarreta não só o entupimento do

sistema de drenagem, mas também o surgimento de infiltrações. Além do mais, o acúmulo de água sobre a ponte durante dias de chuvas torrenciais é muito perigoso, pois possibilita a ocorrência do fenômeno de aquaplanagem, fenômeno esse que ocorre em veículos quando uma lâmina de água faz com que os pneus percam o atrito com o solo, e conseqüentemente, o condutor perca o controle sobre o veículo.

Figura 34 – Acúmulo de vegetação e solo sobre a ponte



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Analisando a Figura 34, observa-se ainda que existem alguns defeitos na laje do tabuleiro, que se não forem recuperados podem intensificar ainda mais os problemas de infiltrações, haja vista que a camada de revestimento asfáltico sobre a ponte, já foi praticamente toda removida.

A Figura 35 mostra a deterioração do guarda-corpo decorrente da corrosão e também o sistema de drenagem com acúmulo de material de solo.

Figura 35 – Deterioração do guarda-corpo e defeitos no revestimento asfáltico



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Durante a execução da obra utilizou-se seixos rolados como agregado graúdo na composição do concreto, talvez por ser um material natural do próprio local da obra. Em razão de sua superfície lisa, a utilização desse agregado produz algumas consequências negativas, como: perda de aderência entre a pasta de cimento e os agregados, redução na resistência à compressão do concreto e facilidade na ocorrência de exsudação e segregação dos materiais que compõem o concreto.

Com a inspeção *in loco*, foi possível verificar que a maioria dos pilares apresentavam fissuras na direção das barras longitudinais, chegando a rachaduras em alguns casos. A presença de fissuras é muito prejudicial ao elemento estrutural, haja vista que possibilita a entrada de agentes agressivos que causam a despassivação da armadura e, conseqüentemente, corrosão generalizada por carbonatação.

As barras corroídas apresentaram redução na seção e perda de aderência na ligação estrutural aço-concreto, propiciando o deslocamento da camada superficial de revestimento do concreto, e como resultado causa a perda da resistência mecânica da estrutura, bem como reduz o seu fator de segurança, podendo até chegar ao colapso da estrutura, em casos mais severos.

A Figura 36 mostra a segregação do concreto, bem como a ocorrência de fissuração em diferentes pontos do pilar.

Figura 36 – Segregação e fissuração do concreto

Fonte: Própria Aatoria, 2022.

Legenda

Fissuração	
Segregação	

Analisando as Figuras 37 e 38, observa-se a presença de manifestações patológicas nas duas longarinas sobre o leito do rio, em estado avançado de degradação, dentre elas estão: eflorescência e corrosão das armaduras. Com relação à eflorescência, esta pode ter sido causada pela presença de umidade no local, e sua consequente reação com os componentes presentes na pasta do concreto, o que favoreceu o surgimento das superfícies esbranquiçadas apresentadas, conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Eflorescência, deslocamento e corrosão em estágio avançado



Legenda

-  Eflorescência
-  Corrosão

Fonte: Própria Autoria, 2022.

Figura 38 – Corrosão em estágio avançado na longarina



Legenda

-  Eflorescência
-  Corrosão

Fonte: Própria Autoria, 2022.

Por meio da Figura 38, nota-se que a deterioração do concreto pode ter acontecido em decorrência do processo de carbonatação, que favoreceu a corrosão das armaduras, resultando no deslocamento do concreto.

Na Figura 39, observa-se o deslocamento do concreto e as armaduras expostas no elemento conhecido como encontro, elemento de transição entre a estrutura da ponte e o terrapleno.

Figura 39 – Encontro



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Manchas de umidade também foram observadas na face inferior do tabuleiro, conforme apresenta a Figura 40. Na Figura 40 também é possível observar o deslocamento do concreto e armaduras aparentes em processo de corrosão.

Figura 40 – Face inferior da laje do tabuleiro



Fonte: Própria Aatoria, 2022.

5.1.2 Medição da profundidade de carbonatação nos pilares

A partir da inspeção visual, verificou-se que as áreas de todos os três pilares que foram aspergidas com fenolftaleína apresentavam-se totalmente carbonatadas, inclusive a região em que foi removido um pedaço do revestimento de concreto. Esse resultado comprova as suspeitas de que a carbonatação foi um dos principais fatores para as manifestações patológicas relacionadas à corrosão dos pilares. Através das Figuras 41 a), 41 b), 41 c) e 41 d) é possível observar que a frente de carbonatação já atingiu completamente a armadura, que já se encontra despassivada, e, pela quantidade de ferrugem evidenciada, com o processo de corrosão bem avançado.

Figura 41 – Comportamento dos pilares após os ensaios com fenolftaleína



(a)

(b)



(c)

(d)

Fonte: Própria Aatoria, 2022.

5.1.3 Medição de abertura de fissuras em pilares

Na Figura 42 a), 42 b) e 42 c) são apresentadas algumas das fissuras observadas e suas respectivas espessuras.

Figura 42 – Medição de abertura de fissuras nos pilares



(a)



(b)

(c)

Fonte: Própria Autoria, 2022.

Os valores obtidos na medição de abertura de fissuras registrados nas figuras anteriores foram: Figura 42 (a) = 3,0 mm, Figura 42 (b) = 3,0 mm e Figura 42 (c) = 4,0 mm.

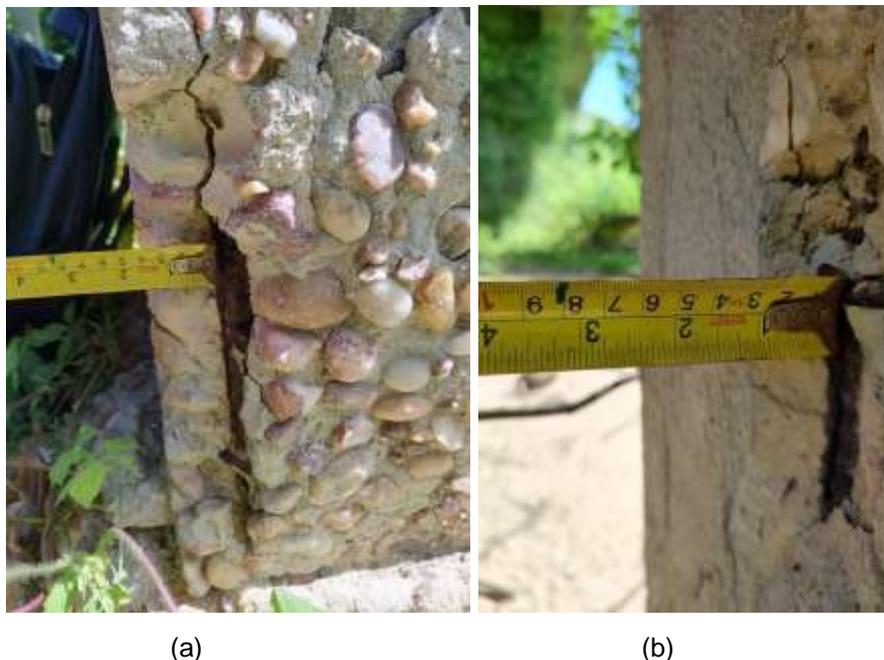
Ainda em relação às fissuras, a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) fornece alguns limites para as aberturas em concreto armado em função da classe de agressividade ambiental que está inserida. Para a classe II, a referida norma permite apenas 0,3 mm, ou seja, foram observadas fissuras com dimensões dez vezes maiores que o permitido.

5.1.4 Medição do cobrimento do concreto em pilares

De acordo com a NBR 6118/2014, a espessura mínima para o cobrimento do pilar para uma classe de agressividade ambiental do tipo II, classe adotada para a ponte, é de 3 mm.

Nas Figuras 43 a), 43 b) e 43 c), são apresentados os valores relativos a medição dos cobrimentos dos pilares com armaduras expostas em que foi possível fazer a medição de sua espessura.

Figura 43 – Medição do cobrimento do concreto nos pilares





(c)

Fonte: Própria Autoria, 2022.

Como pode ser observado nas Figuras 43 a), 43 b) e 43 c) foram obtidos os seguintes valores para os cobrimentos registrados nas figuras anteriores: Figura 43 (a) = 4,0 cm, Figura 43 (b) = 2,5 cm e Figura 43 (c) = 4,0 cm. Fazendo a comparação dos três valores obtidos para o cobrimento com o valor mínimo estipulado pela NBR 6118/2014 para uma Classe de Agressividade Ambiental do tipo II que é de 3,0 cm, tem-se que dos três, apenas um está abaixo do mínimo necessário.

Desta forma, a deficiência em relação à camada de cobrimento não pode ser admitida como a causa do processo de corrosão. Aspectos como presença de umidade e a idade do elemento podem ser uma das explicações para o grau de deterioração evidenciado. A ausência de ações preventivas, de controle do avanço da frente de carbonatação também podem ser uma das responsáveis pelos problemas constatados.

5.1.5 Causas e soluções para as manifestações patológicas observadas

O conhecimento das principais causas das manifestações patológicas observadas é de fundamental importância para que sejam propostas soluções que venham a ser tomadas para a resolução dos problemas. Com base nisso, na

sequência, serão apresentadas as possíveis causas, bem como as medidas de resolução.

No caso das fissuras, uma das principais causas é o avançado estado de corrosão das armaduras. Os produtos da corrosão provocam um aumento do volume ocupado pelas armaduras da ordem de 10%, o que favorece o surgimento de tensões de tração que tendem a fissurar o elemento de concreto.

Caso o problema não seja previamente resolvido, as fissuras de tração vão aumentando até o ponto em que promovem o deslocamento do concreto.

Uma das formas de resolver o problema já desencadeado seria por meio do reparo das áreas afetadas, com substituição dos pontos de armadura corroídos, além da reconstituição do cobrimento.

Com relação à corrosão observada nos elementos de concreto, sua causa pode estar relacionada à exposição das estruturas à umidade, além da ação do CO₂ no interior do cobrimento. O reparo das áreas afetadas é uma forma de evitar um possível colapso da estrutura, em função da perda da área de armadura que foi substituída por agentes de corrosão.

A seguir é apresentado o passo-a-passo, referente ao procedimento de recuperação de elementos afetados por corrosão de armaduras sugerido pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) (2006).

- Definir a área a ser reparada, conforme projeto;
- Caso necessário, deve-se providenciar a sinalização e limitação de tráfego de veículos;
- Construir plataformas de trabalho para garantir acesso ao trecho;
- Fazer a remoção de todo o concreto deteriorado em torno da armadura corroída, com jato d'água ou ferramentas manuais, para não prejudicar ainda mais a armadura ou sua aderência ao concreto; de maneira que a remoção deixe um espaço livre, entre armadura e o concreto são, de no mínimo 2 cm, e ser prolongada até atingir um comprimento de ancoragem de barra íntegra;
- Limpar com cuidado as barras corroídas, com escova de aço para pequenas áreas ou jato de areia para grandes áreas;
- Avaliar a perda da capacidade das barras corroídas e já limpas, se a perda for superior a 10% as barras devem ser suplementadas;

- Após a remoção de todos os resíduos, a armadura tratada e a suplementar, caso esta seja preciso, devem ser pintadas com tinta especial anti-ferruginosa;
- Quando não forem necessárias fôrmas, a seção pode ser recomposta com concreto convencional, moldado no local e aditivado; havendo necessidade de fôrmas, é preferível utilizar o concreto projetado, aditivado e desempenado; em ambos os casos, há que se levar em conta as vibrações provocadas pelo tráfego bem como efetuar cura prolongada, mínima de sete dias.

Falando um pouco acerca das eflorescências constatadas, o problema está relacionado ao próprio contato dos agentes da pasta de cimento com as águas da chuva, ou provenientes do pavimento.

Segundo Novack e Vieira Júnior (2008), é possível remover a eflorescência fazendo uma limpeza com ácido acético. Contudo, dependendo do nível de degradação, pode ser necessário fazer a limpeza da eflorescência com escova de aço, além de uma nova camada de revestimento. Uma medida válida para diminuir a suscetibilidade à eflorescência é optar por concreto dosado com cimentos com baixos teores de álcalis, como aqueles com adição de escória ou pozolanas.

Em relação aos defeitos nos guarda-corpos, a principal causa foi a deterioração por corrosão. Como sugestão para a reabilitação está a restauração da parte danificada seguindo os procedimentos para peças danificadas por corrosão citados anteriormente.

Quanto aos defeitos no pavimento, sua causa está relacionada ao trânsito de veículos, mais especificamente, devido a abrasão causada pelos pneus, como forma de reparo, pode ser feito o recapeamento asfáltico da face superior do tabuleiro.

5.2 Ponte Regis Bittencourt (ponte 02)

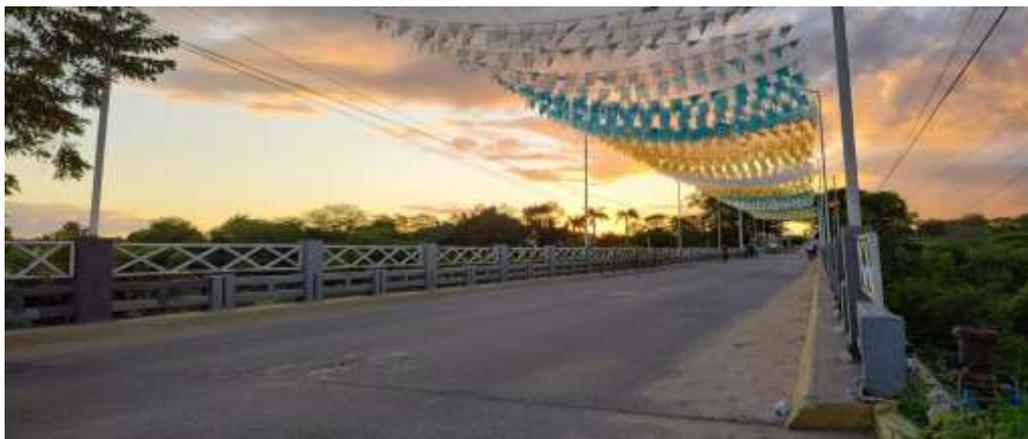
5.2.1 Manifestações patológicas observadas

A obra de arte especial abordada, apresenta-se em estado considerável de deterioração, com destaque para a corrosão do tabuleiro, inexistência de um sistema

de drenagem, biodeterioração do concreto por raízes e redução na seção dos pilares em contato com a água.

A Figura 44 apresenta uma visão geral da ponte abordada, onde nota-se que existe um acúmulo de solo nos canteiros laterais, bem como apresenta alguns defeitos na pista de rolamento. Defeitos esses causados pelo fluxo intenso de veículos sobre a ponte, que através do alto atrito entre os pneus e a pista promove a deterioração superficial da camada de revestimento asfáltico por abrasão.

Figura 44 – Vista geral da ponte Regis Bittencourt



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Ao realizar a visita técnica *in loco*, foi verificado diversas regiões, concentradas mais precisamente na parte em balanço da laje do tabuleiro, que apresentam armaduras expostas à corrosão e seus produtos (redução de seção da barra de aço, perda de aderência do conjunto aço-concreto e deslocamento do concreto), conforme apresenta a Figura 45.

Figura 45 – Corrosão do tabuleiro



Fonte: Própria Autoria, 2022.

A concentração dessas áreas na parte em balanço pode ter sido causada pela inexistência de um sistema de drenagem, haja vista que as águas que não escoam pelas extremidades longitudinais da ponte ficam retidas nas extremidades transversais e, em seguida, infiltram justamente na parte em balanço.

O avançado estado de deterioração também pode ter sido provocado pela própria ação do tempo, aliado à ação da umidade.

Algumas das áreas que apresentam corrosão ainda possuem agravantes, pois ao menos em quatro delas foi visto que plantas nasceram e cresceram de ponta-cabeça sob a face inferior do tabuleiro da ponte, como mostra a Figura 46.

Figura 46 – Presença de plantas na face inferior da laje do tabuleiro



Fonte: Própria Aatoria, 2022.

De acordo com Guabiroba (2012), o crescimento de raízes de plantas em zonas porosas do concreto gera tensões que degradam mecanicamente o concreto, favorecendo a entrada de outros agentes nocivos no interior da estrutura. A presença de plantas na estrutura de concreto caracteriza um ataque biológico, também chamado de biodeterioração.

Na visita ao local, além de ser observado a presença de pelo menos quatro plantas na face inferior do tabuleiro, ainda foi visto que a região onde se encontra uma dessas plantas apresenta gotejamento, demonstrando que a água que fica retida na parte superior da ponte encontra caminho favorável para infiltrar, propiciando condição favorável ao pleno desenvolvimento da planta ao mesmo tempo que promove a decadência do tabuleiro, conforme apresenta a Figura 47.

Figura 47 – Local onde foi presenciado o gotejamento



Fonte: Própria Aatoria, 2022.

A Figura 48 ilustra algumas manchas esbranquiçadas observadas na transversina da ponte, possivelmente efeito do processo de lixiviação e dissolução de produtos solúveis, evidenciando a presença de eflorescência no elemento estrutural.

Figura 48 – Eflorescência na transversina da ponte



Legenda

 Eflorescência

 Corrosão

Fonte: Própria Aatoria, 2022.

Como citado anteriormente, a eflorescência é responsável pela despassivação da armadura e por tornar o concreto mais poroso, possibilitando a entrada de agentes agressivos na estrutura e, desse modo, tornando a estrutura mais propensa ao processo corrosivo. Fato esse comprovado pela Figura 48, onde verifica-se que a armadura já perdeu a sua proteção alcalina e já apresenta armaduras aparentes em estado de corrosão.

A partir da Figura 49 é possível observar a diferença de cenário encontrada entre os meses de janeiro de 2022 e junho de 2022. Na Figura 49 (a) o rio Curimataú estava seco, haja vista que o mesmo só possui água na época de chuva, caracterizando-se como um rio intermitente. Já na Figura 49 (b) o rio está com bastante água impossibilitando a inspeção dos pilares centrais. Através da Figura 49 (b), observa-se que a altura alcançada pela água na época de cheia representa justamente a altura do pilar com redução na seção do elemento estrutural.

Figura 49 – Diferença de cenário encontrada



Fonte: Própria Autoria, 2022

Esse processo de secagem-molhagem pode ter também acelerado o processo de corrosão nesses elementos. Segundo Moraes, Rueda Júnior e Schuenke (2021), diferentes graus de umidade e ventilação podem ser malélicas para as estruturas, e, as regiões mais críticas aos efeitos do processo corrosivo são aquelas submetidas a condições de exposição alternada de umidade e de acesso ao oxigênio, ou seja, locais com repetidos níveis de molhagem e secagem.

Devido a impossibilidade de acesso a alguns pilares que se encontravam parcialmente submersos, foram inspecionados apenas os que se encontravam acima do nível do rio. Do grupo dos pilares que foram inspecionados, apenas um apresentava armadura aparente sendo, portanto, escolhido para a realização do teste de carbonatação com o emprego da fenolftaleína. Como pode ser observado na Figura 50, uma parte do pilar apresenta uma mancha escura, mancha também presente no tijolo comum que está no chão, indícios que levam a crer que o pilar sofreu danos causados por fogo por motivo não identificado.

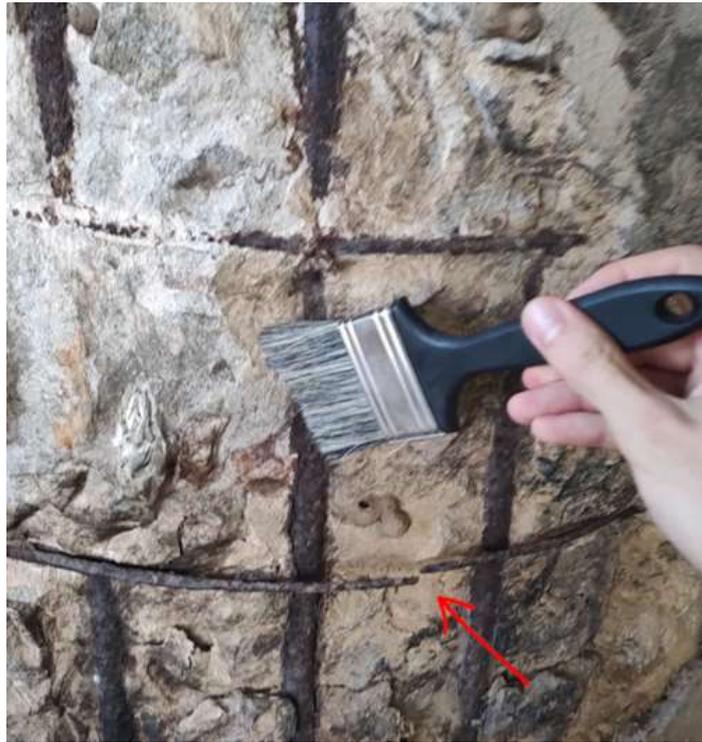
Figura 50 – Manchas escuras encontradas



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Como pode ser observado na Figura 51, um dos estribos do pilar citado anteriormente está rompido, evidenciando que o processo de corrosão já se intensificou.

Figura 51 – Estribo rompido por corrosão



Fonte: Própria Aatoria, 2022.

5.2.2 Medição da profundidade de carbonatação nos pilares

Após a aplicação da fenolftaleína na região do pilar com armadura exposta, surgiu em uma parte da região uma coloração rosada indicando que nessa área o concreto ainda não estava completamente carbonatado. As áreas em que o concreto não apresentou alteração de coloração estão completamente carbonatadas, devido ao contato com o CO₂ presente no ar.

O comportamento do pilar após a realização do ensaio com fenolftaleína pode ser visualizado na Figura 52.

Figura 52 – Comportamento do pilar após o ensaio com fenolftaleína



Fonte: Própria Aatoria, 2022.

Não foram observadas fissuras nos pilares inspecionados.

5.2.3 Medição do cobrimento do concreto

De acordo com a NBR 6118/2014, a espessura mínima que deve ser utilizada na camada de cobrimento do pilar para uma classe de agressividade ambiental do tipo II é de 3 mm.

Na Figura 53 é apresentado o valor relativo ao cobrimento do único pilar com armaduras expostas, em que foi possível fazer a medição de sua espessura.

Figura 53 – Medição do cobrimento do concreto em pilar



Fonte: Própria Autoria, 2022.

Foi obtido um cobrimento de 2,5 cm para o pilar anterior, fazendo a comparação do valor obtido para o cobrimento com o valor mínimo estipulado pela NBR 6118/2014 para uma Classe de Agressividade Ambiental do tipo II que é de 3,0 cm, tem-se que o cobrimento está um pouco a baixo do mínimo necessário.

5.2.4 Causas e soluções para as manifestações patológicas observadas

Em relação a biodeterioração, a mesma é causada pelo nascimento de plantas dentro da estrutura de concreto. As raízes dessas plantas crescem nos poros do concreto provocando tensões que degradam o concreto, propiciando que outros agentes agressivos entrem no interior da estrutura. Para resolver o referido problema, é necessário que se faça a retirada das plantas e, em seguida, ocorra a reconstrução da área afetada.

Tratando sobre a redução na seção dos pilares em contato com a água do rio, a causa desse problema está relacionada ao fato dos pilares passarem por um período de molhagem (período de cheia do rio) e por um período de secagem (período de

seca do rio) ao longo do ano. Essa condição de exposição alternada de umidade e de acesso ao oxigênio faz com que o elemento fique mais propenso ao processo corrosivo.

Não é possível cessar o problema, quanto ao processo natural de secagem e molhagem ao qual o pilar está exposto. Embora seja possível tratar e proteger o elemento estrutural para que ele resista a esse processo natural de secagem-molhagem.

O DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte) (2010) em seu *Manual de Recuperação de Pontes e Viadutos Rodoviários*, cita que a corrosão do concreto, com exceção da degradação causada pela reação álcali-agregado, pode ser tratada a partir das seguintes etapas: remoção do concreto deteriorado, tratamento de trincas e fissuras, reconstrução do elemento com concreto de boa qualidade e aplicação de revestimentos protetores na superfície reparada, tais como tintas e membranas hidrofugantes.

As causas e sugestões de reparos para as demais manifestações patológicas observadas na Ponte Regis Bittencourt são as mesmas apresentadas para a ponte anterior.

6 CONCLUSÃO

A inspeção visual das pontes, através da identificação das manifestações patológicas e das suas respectivas causas são de fundamental importância para que sejam tomadas as devidas medidas corretivas. Buscando mitigar o avanço dos agentes deteriorantes, e assim, manter os parâmetros de funcionalidade e segurança. Embora seja importante destacar que o cuidado com as manifestações patológicas deva ser referido como uma medida de manutenção preventiva e não de urgência. Para que isso ocorra é necessário que os órgãos públicos responsáveis por tais estruturas façam programas de manutenção preventiva periodicamente.

A partir das visitas *in loco* e dos registros fotográficos atrelados ao embasamento teórico, foi possível fazer a identificação das principais manifestações patológicas presentes nas duas pontes de concreto analisadas e de suas respectivas causas.

Na Ponte do Umbuzeiro foram observados defeitos no sistema de drenagem que contribuem para as manifestações patológicas mais relevantes encontradas na ponte, que são a corrosão e a eflorescência, outra manifestação patológica de elevada importância notada foi a fissuração de alguns pilares.

Na Ponte Regis Bittencourt, a manifestação patológica mais preponderante observada foi a corrosão da face inferior do tabuleiro com o agravante da presença de plantas e infiltrações. A redução na seção do pilar, possivelmente causada pelo processo de secagem-molhagem, juntamente com o pilar com armadura exposta também requerem cuidado especial.

Para as diversas manifestações patológicas apresentadas nos elementos estruturais, foram sugeridas técnicas de reabilitação que devem ser seguidas para a manutenção dos parâmetros de funcionalidade e segurança.

Conclui-se que a falta de manutenção atrelada à ação das intempéries são as principais responsáveis por causar, ao longo do tempo, as diversas manifestações patológicas identificadas nas pontes. Levando em consideração o nível de corrosão e

degradação observados nas pontes, é possível afirmar que as duas pontes estudadas necessitam de reparos, e, caso não sejam reparadas, acarretará em uma diminuição na vida útil de tais estruturas.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

BERTOLINI, L. **Materiais de Construção: patologia, reabilitação e prevenção**. Tradução de Leda Beck. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 414p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Recuperação de Pontes e Viadutos Rodoviários**. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Tratamento da corrosão – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**. Diagnóstico do município de Nova Cruz, estado do Rio Grande do Norte. 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 Lagoa d'Anta, estado do Rio Grande do Norte. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

CASCUDO, O. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Corrosão da Armadura. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 2v. ed. Geraldo C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005.

COSTA, Rafaela Salustino da. **Diagnóstico de perdas de água através do método do balanço hídrico e indicadores de desempenho no Sistema Integrado de Abastecimento de Guarabira**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, 2020.

EMMONS, P. H. **Concrete repair and maintenance illustrated**. Kingston: R. S. Means Company, 1994. 295p.

FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão de armaduras do concreto**. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural: Tópicos aplicados**. 1. ed. São Paulo: Editora PINI Ltda, 2008. v. 1. 179p.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2008.

GUABIROBA, R. T. **Patologias em canais de drenagem em concreto -Estudo de caso em BH**. 2012. 62 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 2012.

HOFFMANN, A. T. **Influência de adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001.134 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HUSNI, R. *et al.* **Acciones sobre las estructuras de hormignón. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón**. São Paulo: Editores Paulo Helene e Fernanda Pereira, 2003.p. 39-10

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

JESUS, R. F. A. de. **Inspeção e Reabilitação de Pontes e Viadutos em Betão Armado na R.A.M.** 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Madeira, Funchal, 2015.

MENDES, L. C. *et al.* Pontes em concreto armado em meios de elevada agressividade ambiental. **In: IV CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS**, Córdoba, 2010.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** 2004. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MORAIS, L. S. de; RUEDA JÚNIOR, M.; SCHUENKE, T. de S. **Análise da penetrabilidade de inibidor de corrosão em concretos com diferentes permeabilidades.** 2021. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Patologia das Obras Civas) – Instituto IDD, São Paulo, 2021.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NOVACK, G.; VIEIRA JÚNIOR, G. **Análise diagnóstica dos elementos estruturantes da UPA 24h do município de Tubarão a partir das diretrizes da NBR 15.575.** 2018. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

NOVAES, I. M. de M.; POZNYAKOV, K. Patologias em Estruturas de Concreto Armado. **Boletim do Gerenciamento**, [S.l.], v. 22, n. 22, p. 67-78, jan. 2021. ISSN 2595-6531. Disponível em: <https://nppg.org.br/revistas/boletimdogerenciamento/article/view/539>. Acesso em: 08 mar. 2022.

OLIVEIRA, M. F. de. **Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em Administração.** Catalão: UFG, 2011.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação.** 2006. 191 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 2010. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

- SANCHEZ, L. F. M. **Contribuição aos Estudos dos Métodos de Ensaio na Avaliação das Reações Álcali-Agregado em Concretos**. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- SANTOS, M. R. G. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso**. 2012. 109 f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.
- SENA, G. O. de *et al.* **Patologia das construções**. Salvador: 2B, 2020. 256 p.
- SILVA, T. J. da. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. 1998. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola técnica superior d'enginyers de Camins, Universidade Politècnica da Catalunya, Barcelona, 1998.
- TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolânas: monitoramento em longo prazo e análise de microestrutura**. 2012. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- THEISS A. F. **Avaliação da Corrosão do Aço em Concreto com Adição de Inibidor Migratório de Corrosão frente à ação de íons cloreto**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.
- THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios**. 1. ed. São Paulo: Editora PINI Ltda, 1989.
- VITALI, M. R. V. **Efeito do distanciamento ao mar da contaminação do concreto por cloretos**. 2013. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- VITÓRIO, J. A. P. **Vistorias, Conservação e Gestão de Pontes e Viadutos de Concreto**. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 48., 2006, Recife. Anais do 48°. Recife: IBRACON, 2006.

ZAMODZKI, C. G. S. *et al.* Diagnóstico de manifestações patológicas para recuperação de ponte de concreto armado. **Revista Técnico-Científica do Cre-PR**, 2019