

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DOM BOSCO
CURSO ENGENHARIA CIVIL

RÔMULO SILVA MATOS

ANÁLISE DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM EDIFÍCIO NO CENTRO HISTÓRICO DE SÃO LUÍS – MA: Um estudo de campo com aplicação de Fenolftaleína para avaliar a frente de carbonatação na edificação

São Luís

2021

RÔMULO SILVA MATOS

ANÁLISE DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM EDIFÍCIO NO CENTRO HISTÓRICO DE SÃO LUÍS – MA: Um estudo de campo com aplicação de Fenolftaleína para avaliar a frente de carbonatação na edificação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Esp. Yuri Leandro Abas Frazão

São Luís
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Centro Universitário – UNDB / Biblioteca

Matos, Rômulo Silva

Análise de manifestações patológicas em edifício no Centro Histórico de São Luís-MA: um estudo de campo com aplicação de Fenolftaléina para avaliar a frente de carbonatação na edificação. / Rômulo Silva Matos. __ São Luís, 2021.

63 f.

Orientador: Yuri Leandro Abas Frazão.

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil – Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco – UNDB, 2021.

1. Concreto. 2. Fenolftaleína. 3. Carbonatação. 4. Corrosão.

I. Título.

CDU 691.53(812.1)

RÔMULO SILVA MATOS

ANÁLISE DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM EDIFÍCIO NO CENTRO HISTÓRICO DE SÃO LUÍS – MA: Um estudo de campo com aplicação de Fenolftaleína para avaliar a frente de carbonatação na edificação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: _____
Prof. Esp. Yuri Leandro Abas Frazão

Aprovada em: 21 / 06 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Yuri Leandro Abas Frazão (Orientador)
Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco – UNDB

Prof. Esp. Ricardo Alberto Barros Aguado (1º Examinador)
Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco – UNDB

Prof. Esp. Rafael Carvalho Lima (2º Examinador)
Centro Universitário Unidade de Ensino Superior Dom Bosco - UNDB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre esteve ao meu lado, me abençoando, que mim deu forças para continuar em frente mesmo em meio a tantas dificuldades, que não deixou que eu fraquejasse e se hoje estou nesse ponto é graças a Ele.

Segundo aos meus pais, Luiz Matos e Francisca Alderice, que contribuíram fortemente para minha educação e que são exemplos, meu Pai é um exemplo de homem lutador, que se orgulha da forma simples que vive, e lavrador, que teve sempre a terra como fonte de renda. A minha Mãe, para Ela uma página de agradecimentos seria pouco, que sempre acreditou em mim, mesmo quando eu já desacreditava, se tem alguém responsável por tudo conquistado é Ela, agradeço muito a Deus por tê-la escolhido para ser minha Mãe, esse foi o maior presente a mim concedido.

Não poderia deixar de agradecer à minha segunda família Tia Maria, Claudia (Cacau), Jameson e Eveline que mim acolheram e ajudaram ao longo dessa caminhada.

Aos colegas de faculdade e amigos Manoel de Jesus, Fernanda, Vanessa, Paulo, Samuel e João.

Aos meus compadres Victor e Jerciley que sempre apoiaram, dando força e motivação. Ao longo dessa caminhada foram muitos amigos que contribuíram e que só tenho de agradecer por tudo.

RESUMO

Na presente pesquisa analisou-se as manifestações patológicas da antiga edificação da Seduc, caracterizando a edificação, manifestações patológicas e identificando a frente da carbonatação em pilares, vigas e lajes através de ensaio com indicador de pH Fenolftaleína, incolor a uma faixa pH menor ou igual a oito e vermelho-carmim em faixas superiores, onde é medida a faixa carbonatada em milímetros. O ensaio consiste, utilizando uma marreta e talhadeira, romper o concreto até expor a armadura do elemento estrutural, realizar limpeza com um pincel, verificar as espessuras de cobrimento da armadura, a aplicar a Fenolftaleína e aguardar a reação, esta que é rápida, o concreto não carbonatado apresenta a coloração vermelho-carmim. No total, doze elementos estruturais foram analisados, seis pilares, quatro vigas e duas lajes, destes apenas uma laje não estava carbonatada. O antigo edifício da Seduc tem alguns elementos que exigem um cuidado mais rigoroso, mas isso é com base no plano de utilização da edificação, o ensaio realizado não é fator preponderante para determinar os riscos destes elementos.

Palavras-chaves: Concreto. Fenolftaleína. Carbonatação. Corrosão.

ABSTRACT

In this research, the pathological manifestations of the old building of Seduc were analyzed, characterizing the building, pathological manifestations and identifying the carbonation front in columns, beams and slabs through a test with a pH indicator Phenolphthalein, colorless at a pH range less than or equal to eight and carmine red in the upper bands, where the carbonated band is measured in millimeters. The test consists, using a sledgehammer and chisel, breaking the concrete until exposing the reinforcement of the structural element, cleaning with a brush, checking the reinforcement cover thickness, applying the Phenolphthalein and waiting for the reaction, which is fast, the non-carbonated concrete is red-carmine in color. A total of twelve structural elements were analyzed, six columns, four beams and two slabs, of which only one slab was not carbonated. The old Seduc building has some elements that require more rigorous care, but this is based on the building's utilization plan, the test carried out is not a preponderant factor to determine the risks of these elements.

Keywords: Concrete. Phenolphthalein. Carbonation. Corrosion.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de agressividades ambiental (CAA).....	19
Quadro 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	20
Quadro 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$	21
Quadro 4 - Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto.....	24
Quadro 5 - Classificação dos concretos com base no coeficiente de carbonatação k_{CO_2}	28
Quadro 6 - Espessura do cobrimento da armadura e pé direito	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fissura ou rachadura próxima à abertura de uma edificação	23
Figura 2 - Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.....	27
Figura 3 - Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto.....	30
Figura 4 - Representação esquemática do percurso de difusão do CO ₂ no concreto	31
Figura 5 - Esquema simplificado: modelo da corrosão da armadura do concreto	34
Figura 6 - Planta situação/localização	37
Figura 7 - Fim da rua grande	38
Figura 8 - Dados de adoção e projeto	38
Figura 9 - Vista da fachada.....	39
Figura 10 - Apresentação fachada Shopping Rua Grande.....	40
Figura 11 - Modelagem do canto esquerdo traseiro da edificação no <i>Sketchup</i> e imagem na obra	41
Figura 12 - Detalhamento da edificação em contato com o solo no <i>Sketchup</i> e representação na obra	42
Figura 13 - Fiada de alvenaria para vedação e lixo embaixo da edificação	42
Figura 14 - Camada de reboco.....	43
Figura 15 - Manifestações patológicas em viga, pilar e laje	44
Figura 16 - Fenolftaleína utilizada no estudo.....	45
Figura 17 - Croqui dos pilares, vigas e lajes ensaiados	47
Figura 18 - Materiais utilizados.....	48
Figura 19 - Pilares P1 e P5.....	49
Figura 20 - Pilares P2, P3 e P6	50
Figura 21 - Pilar P4.....	50
Figura 22 - Viga V1.....	51
Figura 23 - Lado esquerdo e direito da figura 22.....	52
Figura 24 - Vigas V2, V3 e V4	52
Figura 25 - Laje L1	53
Figura 26 - Laje L2	54
Figura 27 - Viga V1 e corte transversal	56
Figura 28 - V4 perda de área de aço.....	57

Figura 29 - L2 não carbonatada58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CO₂	Gás Carbônico
Seduc	Secretaria de Estado e Educação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CaOH₂	Hidróxido de Cálcio
CaCO₃	Carbonato de Cálcio
Ca(OH)₂	Hidróxido de Cálcio
SO₂	Dióxido de Enxofre
H₂S	Gás Sulfídrico
NaOH	Hidróxido de Sódio
KOH	Hidróxido de Potássio
OH⁻	Hidroxila
Cl⁻	Cloreto
Fe²⁺	Metal
Fe(OH)₂	Hidróxido de Ferro
MPa	Mega Pascal
Secid	Secretaria de Estado das Cidades
cm	Centímetro
m	Metro
mm	Milímetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Problemática	14
1.2 Hipóteses	14
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Geral.....	14
1.3.2 Específicos.....	14
1.4 Justificativa	15
2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CARBONATADO	16
2.1 Concreto Armado	16
2.1.1 Vida útil e durabilidade.....	17
2.1.2 Propriedades do concreto.....	19
2.1.2.1 Agressividade do ambiente.....	19
2.1.3 Desagregação do concreto.....	21
2.1.4 Retração do concreto.....	22
2.1.5 Fissuração.....	22
2.2 Manifestações Patológicas	24
2.2.1 Ação da carbonatação.....	25
2.2.1.1 Frente de carbonatação.....	27
2.2.1.2 Penetração do CO ₂	29
2.2.2 Ataque por cloreto.....	32
2.2.3 Corrosão da armadura do concreto carbonatado.....	32
3 METODOLOGIA	36
3.1 Tipo de pesquisa	36
3.2 Local do estudo de campo	37
3.3 Caracterização do antigo edifício da Seduc	41

3.4 Caracterização das manifestações patológicas	44
3.5 Ensaio com Fenolftaleína	45
3.5.1 Materiais utilizados	48
3.5.2 Ensaio dos pilares	49
3.5.2 Ensaio das vigas	51
3.5.3 Ensaio das Lajes	53
3.5.4 Dados dos pilares, vigas e lajes	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS	61
ANEXO	63

1 INTRODUÇÃO

Para Neville (2016) cimento, no sentido geral da palavra, pode ser descrito como um material com propriedades adesivas e coesivas que o fazem capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta. Esse elemento é fundamental para a composição básica do concreto, que é a mistura de cimento, água, agregado miúdo e graúdo, mas em determinados casos é utilizado outros elementos, por exemplo: um aditivo. Ainda Neville (2016) descreve a aplicação de materiais cimentícios em povos antigos, os antigos Egípcios que utilizavam gesso impuro, os Gregos e os Romanos utilizavam calcário calcinado e, ao decorrer do tempo, passaram a agregar areia e pedra fragmentada ou fragmentos de tijolos ou telhas ao calcário e à água.

Com o tempo surgiu o conceito de concreto armado, Coêlho (2008) o concreto resiste muito bem aos esforços de compressão e muito mal aos de tração. A partir desse princípio, houve necessidade de estudos no sentido de que os esforços de tração fossem combatidos com a utilização de outro material – o aço, assim surgiu o concreto armado que tem como princípio fundamental atribuir ao concreto a responsabilidade pelos esforços de compressão e ao aço os de tração.

É comum encontrar nas cidades grandes edificações feitas de concreto armado e imaginar que durarão para sempre, mas neste contexto surge o conceito de Patologia das estruturas de concreto. Para Bolina, Tutikian e Helene (2019) Patologia é descrita como ciência que estuda a origem, os mecanismos, os sintomas e a natureza das doenças. Assim sendo o estudo do desvio daquilo que é admitido como a condição normal ou esperada de algo, ou seja, uma anormalidade, que conflita com a integridade ou o comportamento habitual da estrutura. Sousa e Ripper (2009) as deteriorações dessas estruturas podem ser ocasionadas por diversos fatores, como o envelhecimento “natural”, acidentes, e até mesmo a irresponsabilidade de alguns profissionais que optam pela utilização de materiais fora das especificações, na maioria das vezes por alegações econômicas.

O foco deste estudo é as manifestações patológicas devido ao envelhecimento natural e com o agravante da carbonatação do concreto pela exposição ao gás carbônico (CO₂) presente na atmosfera. Andrade Perdriz(1992) o CO₂ presente no ar penetra através da rede de poros do concreto e reage com os constituintes alcalinos da pasta de cimento. Esse processo leva a uma redução do

valor do pH da solução aquosa presente nos interstícios do concreto, que acaba ficando com um pH próximo do neutro.

1.1 Problemática

Quem já passou pelo Centro Histórico de São Luís – MA admirou os incríveis casarões coloniais, de arquitetura portuguesa, e notou que alguns estão se degradando com a ação do tempo e falta de manutenção. Recentemente o governador Flávio Dino, do Estado do Maranhão, lançou um novo programa de revitalização do Centro Histórico de São Luís – MA, neste contexto entender as causas de antigas manifestações patológicas nas edificações é fundamental para prolongar a vida útil. Qual a importância de identificar a frente de carbonatação?

1.2 Hipóteses

Este Trabalho de Conclusão de Curso delimitou-se em analisar as patologias no antigo edifício da Secretaria de Estado da Educação (Seduc), que está em processo de restauração para ser apresentado como Shopping Rua Grande, localizado no Centro Histórico de São Luís – MA na Rua Grande parte central do Centro Histórico de São Luís - MA.

a) Com a utilização Fenolftaleína é possível determinar a vida útil; b) Existe alguma característica das manifestações patológicas ligada a influência da carbonatação na edificação; e c) Há alterações ou agravamento nas manifestações devido à carbonatação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Análise das principais patologias encontradas no edifício Shopping Rua Grande no Centro Histórico de São Luís - MA e aplicação de Fenolftaleína para determinar a frente de carbonatação na estrutura.

1.3.2 Específicos

a) Descrever as características da edificação Shopping Rua Grande no Centro Histórico de São Luís - MA; b) Caracterizar as condições patológica na edificação Shopping Rua Grande no Centro Histórico de São Luís - MA; e c) Identificar a frente da carbonatação em pilares, vigas e laje através de ensaio com Fenolftaleína na edificação Shopping Rua Grande no Centro Histórico de São Luís – MA.

1.4 Justificativa

Um das mais bonitas vistas da capital São Luís, sem dúvida, é dos lindos casarões do Centro Histórico, entre as edificações históricas a serem destacadas, encontra-se o Palácio dos Leões (sede do governo do estado), o Palácio Episcopal, o Convento do Carmo, o Convento das Mercês, a Casa das Tulhas, a Igreja do Rosário, a Igreja do Desterro, a Casa das Minas, a Casa de Nagô e muitos outros. A preservação desse patrimônio mundial é fundamental para o turismo no Centro Histórico da Grande Ilha de São Luís e para o desenvolvimento econômico e social.

Alguns destes casarões estão se degradando com a ação do tempo, devido à falta de manutenção, metodologia construtiva empregada ou até mesmo material empregado. Com o lançamento do programa Nosso Centro Histórico vários ganharam uma nova oportunidade de brilhar, com isso entender as principais causas das manifestações patológicas é fundamental. Para Carmona (2005) o concreto armado apesar de ser uma associação inteligente de materiais está sujeito a vários tipos de deterioração, que podem ser causados por diversos mecanismos, dentre eles a corrosão de armaduras.

Helene (1993) afirma que o fenômeno de corrosão das armaduras em concreto passou a ser, nos últimos 20 anos, o problema econômico de primeira importância na área de construção civil da maioria dos países desenvolvidos. Entender a corrosão das armaduras de concreto e seus mecanismos não é só um fator econômico, mas também de segurança. Segundo G1 (2018) um especialista associa o possível motivo do desabamento do viaduto na Marginal Pinheiros, na Zona Oeste de São Paulo em (2018), à corrosão da armadura devido a infiltração de água.

Ainda Helene (1993) o fenômeno de corrosão de armaduras ocorre segundo vários fatores e que os principais fatores podem ser analisados isolado e individualmente, somente através do estudo e entendimento desses fatores e

mecanismos de ação será possível evitar em obras novas e principalmente corrigir os problemas em estruturas existentes.

2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO CARBONATADO

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos teóricos sobre o tema, com base em revisão bibliográfica e trabalhos semelhantes e que servirão de guia para os procedimentos que serão realizados em campo.

Para Souza e Ripper (2009) o homem desde dos primórdios da civilização tem a preocupação de adaptar às suas necessidades com a construção de estruturas, e que isto acumulou na humanidade um grande acervo científico ao longo dos séculos, o que permitiu o desenvolvimento da tecnologia da construção. O homem está em constante evolução e adaptação, e com isso cresce a necessidade de novas construções.

Ainda de acordo com Souza e Ripper (2009, p. 13):

O crescimento sempre acelerado da construção civil, em alguns países e épocas, provocou a necessidade de inovações que trouxeram, em si, a aceitação implícita de maiores riscos. Aceitos estes riscos, ainda que dentro de certos limites, posto que regulamentados das mais diversas formas, a progressão do desenvolvimento tecnológico aconteceu naturalmente, e, com ela, o aumento do conhecimento sobre estruturas e materiais, em particular através do estudo e análise dos erros acontecidos, que têm resultado em deterioração precoce ou em acidentes.

Para Bastos (2006) os materiais inicialmente empregados nas construções foram a pedra natural e madeira, posteriormente sendo o ferro e o aço, já o concreto armado surgiu por volta de 1850.

2.1 Concreto Armado

Basto (2006) descreve o concreto como um composto constituído de água¹, cimento², agregados graúdo e miúdo, e ar, podendo também conter adições (cinza volante, pozolanas, sílica ativa, etc.) e aditivos químicos para melhorar ou modificar as propriedades básicas.

Para Carvalho e Figueiredo Filho (2015) o concreto é um material composto de água, cimento e agregados formando uma pasta e que o concreto armado é a associação desta pasta e armadura convenientemente colocada (armadura passiva), de um modo que ambos resistam solidariamente aos esforços solicitantes. Na construção civil é o casamento perfeito, o concreto resistindo aos esforços de compressão e a armadura de tração.

A NBR 6118 (ABNT, 2004) descreve elementos de concreto armado: aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência.

Basto (2006) cita dois aspectos positivos do trabalho conjunto entre o concreto e o aço, um é o fato dos coeficientes de dilatação térmica dos dois materiais serem praticamente iguais e o outro é que o concreto protege a armadura contra a corrosão, mas essa proteção só é garantida com a existência de uma espessura de concreto entre a barra de aço e a superfície externa da peça (denominado cobrimento).

2.1.1 Vida útil e durabilidade

Para Souza e Ripper (2009) entende-se como durabilidade as características de deterioração do material concreto e dos sistemas estruturais e, a vida útil a avaliação da resposta que dará aos efeitos da agressividade ambiental.

Bolina, Tukikian e Helene (2019) cabe aos profissionais envolvidos na concepção da edificação e aos usuários que dela usufruem implantar medidas que visem preservar ou atingir essas exigências. Todos os envolvidos na edificação

¹Bastos (2006) descreve a água no concreto como um desencadeador das reações químicas do cimento, que são conhecidas como reações hidratadas, que irão garantir as propriedades de resistência e durabilidade.

²Cimento pode ser descrito como um material com propriedade adesivas e coesivas que o tornam capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta, onde na área da construção civil o significado do termo é restrito a materiais aglomerantes utilizados com pedras, areia, tijolos, blocos para alvenaria, etc. (NEVILLE, 2016).

possuem a responsabilidade de edificar um bem que atende a uma vida útil de, no mínimo, o tempo definido em projeto.

Helene (1997) o problema da durabilidade das estruturas de concreto implica em bem responder algumas questões gerais:

1. Quais são os mecanismos de envelhecimento das estruturas de concreto armado e protendido?
2. Como classificar o meio ambiente quanto à sua agressividade à armadura e ao concreto?
3. Como classificar o concreto quanto à sua resistência aos diferentes meios agressivos?
4. Qual a correspondência entre agressividade do meio e a resistência à deterioração e ao envelhecimento da estrutura de concreto?
5. Qual a definição de vida útil?
6. Quais são os métodos de previsão da vida útil?
7. Quais devem ser os critérios de projeto arquitetônico e estrutural?
8. Como deve ser a dosagem e a produção do concreto?
9. Quais os procedimentos adequados de execução e controle da estrutura?
10. Quais os procedimentos e critérios para bem executar a vistoria, o monitoramento e a manutenção das estruturas?

Segundo NBR 6118 (ABNT, 2004) o conceito de vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo.

Para Helene (1993) por vida útil entende-se o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada e descreve três situações:

- a) Período do tempo que vai até a despassivação da armadura: chamada *vida útil de projeto*, normalmente correspondente ao período de tempo necessário para a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinjam a armadura (HELENE, 1993);
- b) Período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície ou ainda destacamento do concreto de cobrimento: chamada *vida útil de serviço ou de utilização*, e depende de caso a caso pois em

certos locais é inadmissível que uma estrutura de concreto apresente manchas de corrosão, fissuras e queda de pedaços de concreto, podendo ser considerado o momento que termina a *vida útil de serviço* (HELENE, 1993);

c) Período de tempo que vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura: chamada *vida útil total*, correspondendo ao período de tempo no qual há uma redução significativa da seção resistente da armadura ou perda de aderência armadura/concreto (HELENE, 1993).

2.1.2 Propriedades do concreto

Coêlho (2008) descreve quatro propriedades do concreto importantes: *trabalhabilidade*, que deverá ser compatível com as dimensões da peça a concretar, distribuição das armaduras e com os processos de lançamento e adensamento a serem usados; *durabilidade*, em caso de ambiente reconhecidamente agressivo, deverá ser tomados cuidados em relação aos materiais utilizados, respeitando o mínimo de consumo de cimento e o máximo valor água/cimento; *resistência mecânica*, o concreto aplicado deverá apresentar uma resistência característica igual a descrita no projeto; *agressividade do ambiente*, está será trabalhada no próximo tópico, pois é fundamental para determinar a qualidade mínima do concreto, um dos principais fatores que influência na carbonatação do concreto.

2.1.2.1 Agressividade do ambiente

A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentes das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas NBR 6118 (ABNT, 2004). Na execução de um projeto estrutural é fundamental seguir o que rege a NBR 6118, sobre a classificação de agressividade ambiental, para que se obtenha a vida útil de projeto, no Quadro 1 pode ser observado as diferentes classes de agressividades.

Quadro 1 - Classes de agressividades ambiental (CAA)

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

Fonte: ABNT NBR 6118, (2014).

O Quadro 1 associa a classe de agressividade com o nível, o meio e o risco. A classificação do ambiente de agressividade é importante para determinação da qualidade do concreto a ser aplicado e o cobrimento mínimo da armadura, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2004) a durabilidade das estruturas é altamente dependente das características do concreto, da espessura e da qualidade do concreto do cobrimento da armadura, tal como pode ser observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	CP	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

Fonte: ABNT NBR 6118, (2014).

O Quadro 2 indica a relação água/cimento e resistência à compressão do concreto, para concreto armado e protendido, associados aos quatro níveis de ambientes de agressividade. O cobrimento mínimo da armadura é o menor valor que deve ser respeitado ao longo de todo o elemento considerado, e que para garantir o cobrimento mínimo (C_{\min}), o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (C_{nom}), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc) de 10 mm NBR 6118 (ABNT, 2004), tal como pode ser observado no Quadro 03.

Quadro 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$

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

Fonte: ABNT NBR 6118, (2014).

Para Coêlho (2008) ensaios comprobatórios de desempenho da durabilidade da estrutura frente ao tipo e nível de agressividade previsto em projeto deve estabelecer os parâmetros mínimos a serem atendidos. Na falta destes, permite-se adotar os requisitos mínimos expressos no Quadro 2.

Uma edificação construída no meio urbano tem uma classe de agressividade, Quadro 1, nível II, essa classificação é fundamental para determinar a qualidade do concreto e cobrimento da armadura; qualidade do concreto, Quadro 2, ou seja, fator água/cimento maior ou igual 0,60 e resistência à compressão 25 MPa; cobrimento da armadura, Quadro 3, para lajes 25mm e para vigas, pilares e elementos estruturais em contato com o solo 30mm.

2.1.3 Desagregação do concreto

Souza e Ripper (2009) é um fenômeno que frequentemente pode ser observado nas estruturas de concreto, causado pelos mais diversos fatores, ocorrendo, na maioria dos casos, em conjunto com a fissuração. Ao se analisar uma estrutura de concreto que esteja fissurada, os primeiros passos a serem dados consistem na elaboração do mapeamento das fissuras e em sua classificação (SOUZA e RIPPER, 2009).

A desagregação do concreto por meio da expansão da armadura ocorre devido o ferro ir criando o óxido de ferro hidratado. Segundo Souza e Ripper (2009) o óxido de ferro hidratado para ocupar espaço exerce uma pressão sobre o material que o confina (concreto) da ordem de 15 MPa, que é suficiente para fraturar o concreto e posteriormente desagregar.

2.1.4 Retração do concreto

A retração pode ocorrer por secagem, por assentamento plástico, autógena e por carbonatação, a pôr assentamento plástico é bem explicada ao analisar uma ponte longa onde tem uns espaços entre as juntas, isso se dá para combater a retração por assentamento plástico. A retração por assentamento plástico é quando o concreto se adensa e, após o endurecimento, elementos fixos e rígidos restringem a sua movimentação, como eletrodutos e barras de aço (BOLINA, TUKIKIAN e HELENE, 2019).

[...] Já a retração autógena ocorre devido ao volume dos compostos hidratados, o qual é menor que o volume do cimento mais o da água. Ou seja, toda partícula de cimento que hidrata provoca uma pequena contração na mistura. Logo, é uma manifestação patológica que ocorre, mais comumente, em concretos com elevados consumos de cimento, como os concretos de alta resistência [...] (BOLINA, TUKIKIAN e HELENE, 2019, p. 109).

Já por carbonatação tem uma semelhança com a autógena, já que ambas são contrações químicas. “Ocorre quando o hidróxido de cálcio (CaOH_2) do concreto hidratado reage com o CO_2 do ambiente, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3). Essa retração irá acontecer ao longo da vida útil do elemento e em ambientes mais agressivos e com o concreto desprotegido (BOLINA, TUKIKIAN e HELENE, 2019).

2.1.5 Fissuração

As fissuras podem ser consideradas como a manifestação patológica característica das estruturas de concreto, sendo mesmo o dano de ocorrência mais comum. Ao se analisar uma estrutura de concreto que esteja fissurada, os primeiros passos a serem dados consistem na elaboração do mapeamento das fissuras e em sua classificação (SOUZA e RIPPER, 2009), tal como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Fissura ou rachadura próxima à abertura de uma edificação



Fonte: Bolina, Tukikian e Helene, (2019).

As causas dessas fissuras são muitas diversas, e uma análise técnica será fundamental para a sua definição, algumas podem estar ligadas a recalque da fundação ou por falta de verga e contraverga em aberturas, como em janelas e portas, o que talvez seja o caso da Figura 1.

Para Helene (1993) o aparecimento de fissuras nas estruturas de concreto armado é inerente aos materiais que a compõem. Já Neville (2016). afirma que é provável que a fissuração ocorra devido a falhas localizadas na aderência entre o cimento e o agregado

As fissuras inerentes ao concreto armado constituem um caminho rápido de penetração dos agentes agressivos até a armadura, alguns estudos recentes contemplam uma abertura máxima admissível das fissuras na superfície da ordem de

0,4mm ou menos, pois em geral estas aberturas se obturam com os próprios produtos de corrosão, o que não implica na redução a vida útil da estrutura (ANDRADE PERDRIX, 1992). A penetração de agentes agressivos ao concreto até atingir a armadura não é exclusivamente através de fissuras, afirma (HELENE, 1997).

2.2 Manifestações Patológicas

Para Trindade (2015) com o surgimento do concreto vieram as manifestações patológicas que o mesmo pode causar devido ao desleixo, má utilização, mão de obra desqualificada ou até mesmo falta de conhecimento de como empregá-lo corretamente.

Quanto maior a acuidade na avaliação de um processo patológico instalado, maior será a confiança do profissional na recomendação da medida corretiva e, portanto, no sucesso da intervenção (BOLINA, TUTIKIAN e HELENE, 2019, p. 26).

Bolina, Tukikian e Helene (2019) afirmam que cabe ao patólogo essa tarefa, sendo responsável por trabalhos técnicos, na identificação, justificação e diagnóstico e prognóstico da patologia. Diz ainda que no Brasil essa função é dada para arquiteto ou engenheiro civil, conforme a Lei nº 5.194, de 24 de dezembro de 1966.

Souza e Ripper (2009) montam um quadro com alguns autores que ao longo dos tempos procuram definir quais atividades que tenham sido responsáveis pela maior quantidade de erros, percentualmente, que causaram ocorrências de problemas patológicos, tal como pode ser observado no Quadro 4.

Quadro 4 - Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto

FONTE DE PESQUISA	CAUSAS DOS PROBLEMAS PATOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO			
	Concepção e projeto	Materiais	Execução	Utilização e outras
Edward Grunau Paulo Helene (1993)	44	8	8	10
D. E. Allen (Canadá) (1979)	55	← 49 →		

C.S.T.C (Bélgica) Verçoza (1991)	46	5	2	17
C.E.B Boletin 157 (1982)	50	← 40 →		10
Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Álvares Penteado Verçoza (1991)	18	6	52	24
B.R.E.A.S (Reino Unido) (1972)	58	2	5	11
Bureau Securitas (1979)	← 88 →			12

Fonte: Adaptado de Souza e Ripper, (2009).

A soma das causas dos problemas patológicos em sua maioria é igual a 100, Souza e Ripper (2009) descreve que todos autores seguem a classificação-padrão, que é às origens dos vários problemas patológicos, o que em alguns casos existem lacunas, e que consideram determinado problema como resultante de mais de uma causa, ocorrendo a soma percentual das parcelas superior a 100, um exemplo é D.E.Allen (Canadá, 1979) que a soma percentual das parcelas é igual a 104.

É quase que unânime entre os autores que a principal causa, de problemas patológicos em estruturas de concreto, está associada à concepção e projeto. Souza e Ripper (2009) descreve que quanto mais permissivo um concreto for ao transporte de água, gases e de outros agentes agressivos, maior será a probabilidade da sua degradação, bem como da do aço que deveria proteger. Neste caso a degradação dependerá de dois fatores: porosidade do concreto e condições ambientais da superfície.

Tomados todos os cuidados na análise de concepção e projeto, escolha de matérias, execução e utilização e outras, as manifestações patológicas ocorreram durante a vida útil da estrutura, mas de forma controlada e prevista. Nesta pesquisa o foco é nas ações da carbonatação pela difusão de gás carbônico (CO₂) e suas consequências.

2.2.1 Ação da carbonatação

Para Helene (1993) no processo de hidratação do cimento Portland é liberado hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que acumula nas superfícies expostas das estruturas de concreto e tem uma alta alcalinidade da solução intersticial, no entanto com o tempo, e essencialmente pela a presença do CO_2 presente na atmosfera, pode ser reduzida. Ainda descreve outros gases ácidos que também contribui para a redução do pH da solução presente nos poros do concreto, dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S).

O processo de transformação, por ação do CO_2 , dos compostos do cimento hidratado em carbonatos, denominado carbonatação do concreto, ocorre lentamente segundo a reação principal; $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (HELENE, 1993, p. 99).

Na soma do hidróxido de cálcio e o gás carbônico resulta no carbonato de cálcio e na reação libera água. Possan (2010) descreve a carbonatação como um dos principais fenômenos físico-químicos que pode limitar a vida útil da estrutura de concreto armado, pois essa manifestação química pode alterar a estabilidade da película passivante da armadura, iniciando o processo de corrosão. Helene (1993) afirma que carbonatação não prejudica por si só o concreto simples e que concretos carbonatados são mais resistentes e mais impermeáveis, no entanto como o concreto armado é a mistura do concreto simples mais a junção de armadura, o problema ocorre com a redução da alcalinidade da solução presente nos poros ao redor das armaduras.

Carmona (2005) associa o fato de as armaduras estarem protegidas devido o concreto, não afetado pela carbonatação, possuir um pH alcalino de aproximadamente 13. Helene (1993) descreve que com o avanço da carbonatação o pH do CaCO_3 é reduzido para 8,3 a 9 à temperatura ambiente, reduzindo substancialmente as condições de estabilidade química a capa ou película passivadora do aço, criando então condições para a corrosão da armadura.

O Ca(OH)_2 por ser menos solúvel que os outros álcalis, o hidróxido de sódio (NaOH), e o hidróxido de potássio (KOH) encontra-se normalmente na forma de cristais enquanto os outros estão dissolvidos na forma de íons. A reação de carbonatação inicia nos álcalis NaOH e KOH e posteriormente no Ca(OH)_2 , isso se deve pela a solubilidade do Ca(OH)_2 depender da concentração de hidroxila (OH^-) na solução intersticial. A chamada frente de carbonatação é uma série de reações

complexas e intermediárias sendo o CaCO_3 mais importante no final do processo, segundo (HELENE, 1993).

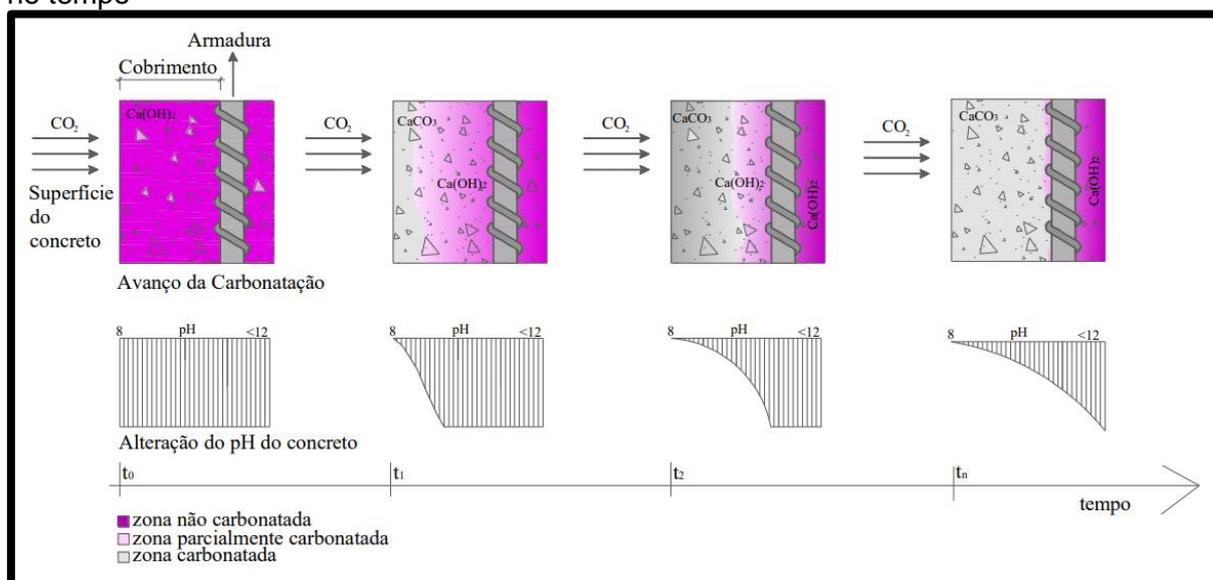
2.2.1.1 Frente de carbonatação

Helene (1993) afirma que em poros saturados de água a difusão de CO_2 será desprezível e em poros excessivamente secos faltará água para que a reação ocorra, dando a ideia que o concreto deve estar úmido para o avanço da carbonatação.

[...] A despassivação deletéria só ocorre de maneira significativa em ambientes de umidade relativa abaixo de 98% e acima de 60%, ou em ambientes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, possibilitando a instalação da corrosão [...] (HELENE, 2004, p. 04).

A penetração de CO_2 acontece de fora para dentro, devido a concentração ser maior externamente, estando diretamente ligada ao concreto de cobrimento, importante para a proteção e conservação das estruturas, afirma (FERREIRA, 2013), tal como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo



Fonte: Possan, (2010).

A Figura 2 demonstra penetração do CO_2 em relação ao tempo do concreto e que se dá da parte externa para a interior, sendo a parte rosada área não carbonatada e essa diferenciação pode ser realizado com a utilização de

Fenolftaleína³. No avanço da frente de carbonatação Possan (2010) descreve a existência de três zonas distintas que podem ser observadas na Figura 2: uma não carbonatada (pH inalterado), representada no tempo t_0 ; outra parcialmente carbonatada, tempos t_1 e t_2 ; e uma carbonatada, tempo t_n .

Possan (2010) com o ingresso de CO_2 como descrito nos tempos (t_1 e t_2) começa as reações deste gás com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ encontrado no cimento, ocorrendo a formação do CaCO_3 o que reduz o pH do concreto, quando esse processo chega próximo da armadura, tempo (t_n), diz que a mesma está despassivada (desprotegida), estando suscetível à corrosão. Para Helene (1993) ao chegar no estágio (t_n) a estrutura atingiu a vida útil de projeto.

Helene (1993) descreve em seu trabalho uma equação em que a espessura carbonatada seja função da raiz quadrada do tempo, tal como pode ser observado na equação (1):

$$e_{\text{CO}_2} = k_{\text{CO}_2} * \sqrt{t} \quad \text{Equação 1}$$

e_{CO_2} = espessura ou profundidade carbonatada em (mm);

t = tempo de exposição ao CO_2 em anos;

k_{CO_2} = constante que depende da difusividade do CO_2 , do gradiente de concentração de CO_2 no ambiente e da quantidade retida, unidade de medida é mm. ano^{1/2}.

Com essa equação é possível determinar o valor de k_{CO_2} , que entre os valores é o mais complexo de ser determinado, através do ensaio de frente da carbonatação utilizando Fenolftaleína. Helene (1993) monta um quadro com a classificação do concreto e relaciona com intervalos de k_{CO_2} , onde associa a uma profundidade provável de e_{CO_2} com base de anos da estrutura analisada, tal como pode ser observado no Quadro 5.

Quadro 5 - Classificação dos concretos com base no coeficiente de carbonatação k_{CO_2}

³ Fenolftaleína é um indicador químico utilizado para determinar a mudança de pH entre 8 e 10, acima desse valor apresenta coloração vermelho-carmim, incolor abaixo dessa faixa. (HELENE, 1993)

Classificação do concreto	Coeficiente de carbonatação	Resistência característica do concreto à compressão	Profundidade carbonatada provável	
	k_{CO_2}	f_{ck}	Em 15 anos	Em 50 anos
	mm.ano ^{1/2}	MPa	mm	mm
Durável	≤ 3	> 35	11	20
Normal	3 a 6	20 a 35	22	40
Deficiente	≥ 6	< 20	33	60

Fonte: Helene, (1993).

Helene (1993) afirma que esses coeficientes se aplicam a concretos de cimento Portland comum, submetidos a cura adequada durante período igual ou superior a 5 dias, em umidade relativa entre 60 e 80% com temperaturas de 20 a 30°C e concentração normal de gás carbônico no ar (0,03%).

2.2.1.2 Penetração do CO₂

Para Helene (1993) a concentração de CO₂ no ar, pode variar de 0,03 a 0,05% em atmosferas rurais e de 0,1 a 1,2% em locais de tráfego pesado.

Mota, et al., (2012) descrevem que a penetração em dissolução aquosa dos agentes agressivos, no concreto e armadura, se dá por intermédio de chuvas ou umidades através da rede de poros conectados. Já Helene (1993) descreve que a penetração de CO₂ no concreto é preponderantemente por um mecanismo de difusão, onde influenciará a concentração de CO₂ no ambiente externo. Possan (2010) afirma que três mecanismos distintos de difusão de gases, os quais transportam o CO₂ para o interior do concreto, tanto na fase gasosa como na dissolvida e pode correr por um ou mais destes mecanismos, são eles:

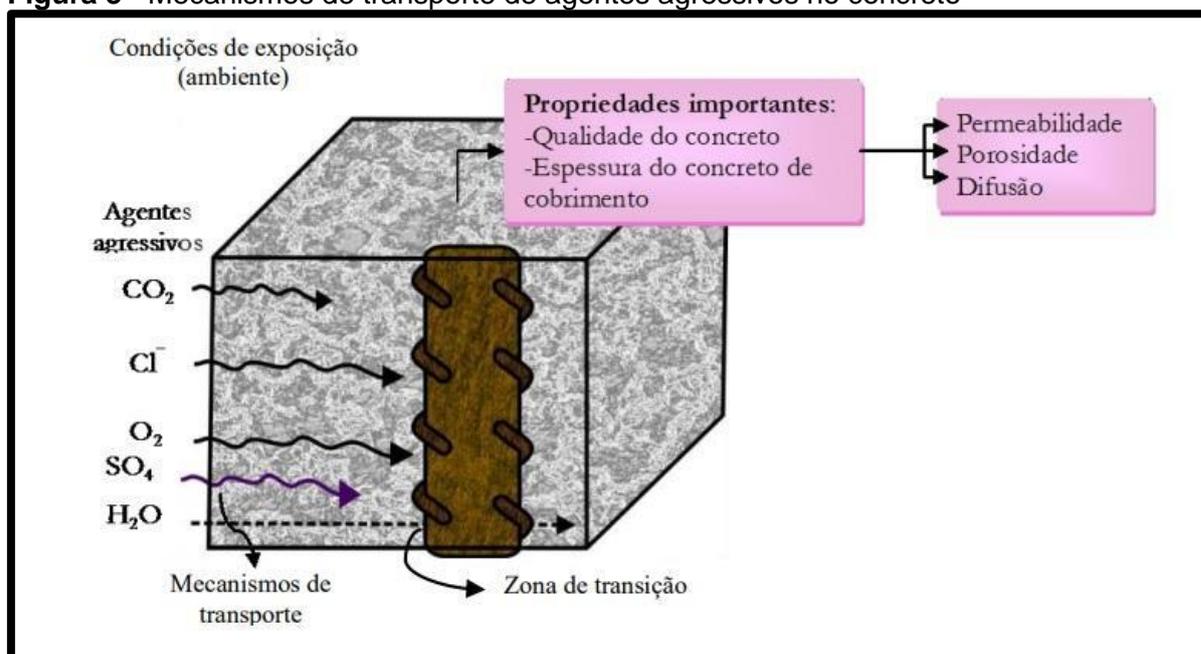
- a) Difusão molecular: é a mistura de moléculas e colisões de moléculas até que a mistura atinja uma composição uniforme (POSSAN, 2010);

b) Difusão de Knudsen: acontece devido à colisão das moléculas entre si e com as paredes, cuja a frequência será maior quanto menor o diâmetro dos poros (POSSAN, 2010);

c) Difusão superficial: ocorre quando as moléculas de CO_2 adsorvidas são transportadas ao longo das paredes dos poros, através de uma sucessão de reações de adsorção-dessorção (POSSAN, 2010).

Possan (2010) ainda descreve que a atuação do mecanismo de transporte depende do tipo do agente agressivo, (cloreto, CO_2 , sulfato, entre outros). A cinética de cada um destes mecanismos é diferente, mas estes estão condicionados à estrutura dos poros do concreto (distribuição, dimensão, volume e conectividade), tal como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto

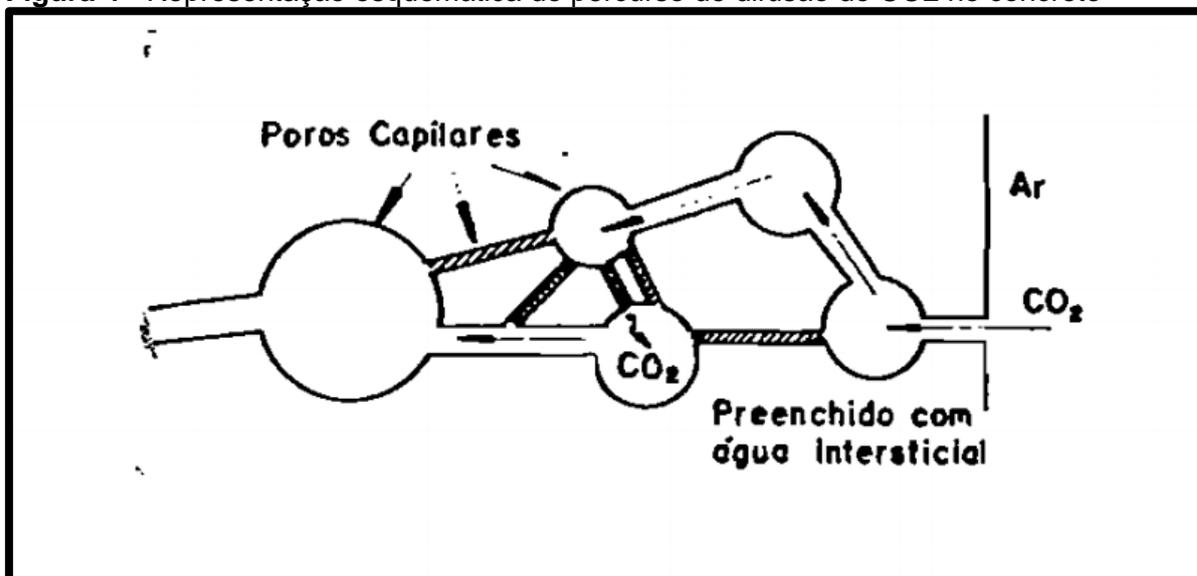


Fonte: Possan, (2010).

Para Possan (2010) a qualidade do concreto é peça fundamental para garantir maior durabilidade à estrutura, que ele bem compactado e com relação a/c (água/cimento) inferior a 0,50 apresentará poucos poros e pouca conectividade entre eles, baixa permeabilidade, baixa difusibilidade e absorção, com baixa condutividade elétrica (alta resistividade) o que limita a ação dos agentes agressivos. Helene (1993) afirma que o concreto possui poros e capilares com diâmetros variando entre

angstroms⁴ até milímetros. Em concreto não submersos, esses poros estão parcialmente preenchidos por água, tal como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática do percurso de difusão do CO₂ no concreto



Fonte: Helene, (1993).

Na Figura 4 os poros capilares de maior diâmetro atuam como canais de transporte do CO₂, isso se deve por não estarem saturados, e os capilares de reduzidos diâmetros e preenchidos de água atuam como retardadores do processo de carbonatação. A difusão de CO₂ na fase líquida e na fase gasosa é grandemente influenciada pelo teor de umidade do concreto o qual, em última instância, depende da umidade relativa do ambiente e do microclima. A temperatura tem grande influência no desenvolvimento das reações químicas, onde em países de clima equatorial e tropical são mais graves e mais intensas comparado, em estruturas similares, a países de climas temperados, descreve (HELENE, 1993).

Possan (2010) cita três fatores principais que afetam o fenômeno de carbonatação:

- Condições ambientais (concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa do ar);
- Às condições de exposição (ambiente interno, externo, protegido ou desprotegido da chuva);

⁴ Unidade de medida equivalente a 10⁻¹⁰m ou 10⁻⁷mm (HELENE, 1933, p. 106).

- Às características do concreto (composição química do aglomerante, traço específico e a qualidade da execução).

Helene (1993) afirma que ao se tratar de corrosão de armaduras principalmente por carbonatação, a qualidade do concreto de cobrimento das armaduras realmente interessa, não a qualidade do interior do componente estrutural, mas sim de cobrimento, será esses poucos centímetros de concreto que controlará a velocidade de penetração de gases no componente estrutural.

2.2.2 Ataque por cloreto

O processo de ataque por cloreto é bem parecido do CO_2 . Para Helene (1993) a corrosão localizada, muito conhecida como pites (puntiforme), está associada à despassivação pontual do aço geralmente resultante de ação de íons de cloretos (Cl^-) ou fissuras. No entanto, essa despassivação da armadura, por íons de cloretos, pode ocorrer mesmo com o pH elevado, sendo bem mais agressiva.

Helene (1993) chama atenção para a frente de carbonatação e de cloreto terem influências opostas em questão a resistividade do concreto, enquanto a carbonatação aumenta, a presença de cloretos diminui a resistividade. A fonte de cloretos pode muitas vezes ter origem no próprio sistema construtivo ou na utilização, ao se lavar a fachada com ácido muriático, que nada mais é que ácido clorídrico comercial, ou na adição de aditivo no concreto por exemplo.

Figueiredo e Meira (2013) descreve a penetração dos íons de Cl^- nos poros do concreto em conjunto com a água e o oxigênio, e quando encontram a película passivada da armadura, provocam desestabilizações pontuais nessa película, esse fenômeno foi tentado ser explicado por várias teorias, e grande maioria converge em relação ao fato de que a ruptura da película passivadora é algo dinâmico, com eventos repetidos de despassivação e repassivação, até a despassivação definitiva.

2.2.3 Corrosão da armadura do concreto carbonatado

Helene (1993) define a corrosão como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, sendo por ação física, química, eletroquímica ou a combinação destas. Exemplos: ações físicas, os fenômenos de erosão e cavitação; ação eletroquímica, as reações de expansão e de lixiviação dos componentes hidratados

da pasta de cimento Portland em argamassas e concretos. Para Figueiredo e Meira (2013) a corrosão é um fenômeno que, na sua grande maioria, é de natureza eletroquímica.

Helene (1993) descreve dois importantes processos de corrosão que podem agir: a já citada corrosão eletroquímica e de oxidação direta. Chamando a atenção para a corrosão eletroquímica, onde é um fenômeno que o engenheiro civil deve conhecer e com o qual deve se preocupar, pois tal conhecimento proverá habilidades para evitá-los e corrigi-los com sucesso. Para de Castro Bolina e Cascudo (2013) a corrosão das armaduras lidera a incidência das manifestações patológicas em estruturas de concreto e que tem um alto impacto social e econômico, alguns casos podendo causar até perdas de vidas humanas.

Descrever as reações eletroquímicas é algo bem complexo, Helene (1993) em seu trabalho apresenta os conceitos básicos do fenômeno da corrosão das armaduras no concreto armado e converge para um modelo simplificado e prático de representação do fenômeno que reúne os fatores determinantes do processo.

Para Possan (2010) os principais agentes agressivos desencadeadores da corrosão são os íons cloreto (Cl^-) e o gás carbônico (CO_2), que podem agir isolados ou de forma conjunta. A corrosão de natureza eletroquímica somente ocorre em meio aquoso, formando pilhas ou células de corrosão quando existe um eletrólito, que é uma diferença de potencial (ddp) e oxigênio, sendo acelerada na presença de agentes agressivos.

Andrade Perdrix (1992) desaparecida a capa passivante, devido a carbonatação do concreto, o aço se corrói de forma generalizada, como se estivesse exposta à atmosfera sem nenhuma proteção, no entanto com um agravante, a umidade permanece no interior do concreto, já que o concreto absorve umidade muito rapidamente e seca muito devagar, essa umidade fica em contato com a armadura muito mais tempo que se esta estivesse livremente exposta ao ar.

A corrosão eletroquímica se dá através da dissolução do aço num meio aquoso onde os átomos do aço se dissolvem como íons, com formação de óxidos/hidróxidos de ferro, produtos de corrosão de cor variando de preto, verde escuro, marrom claro a marrom escuro, nessa ordem, segundo reações com pouco acesso de oxigênio até reações com franco acesso de oxigênio descreve (HELENE, 1993).

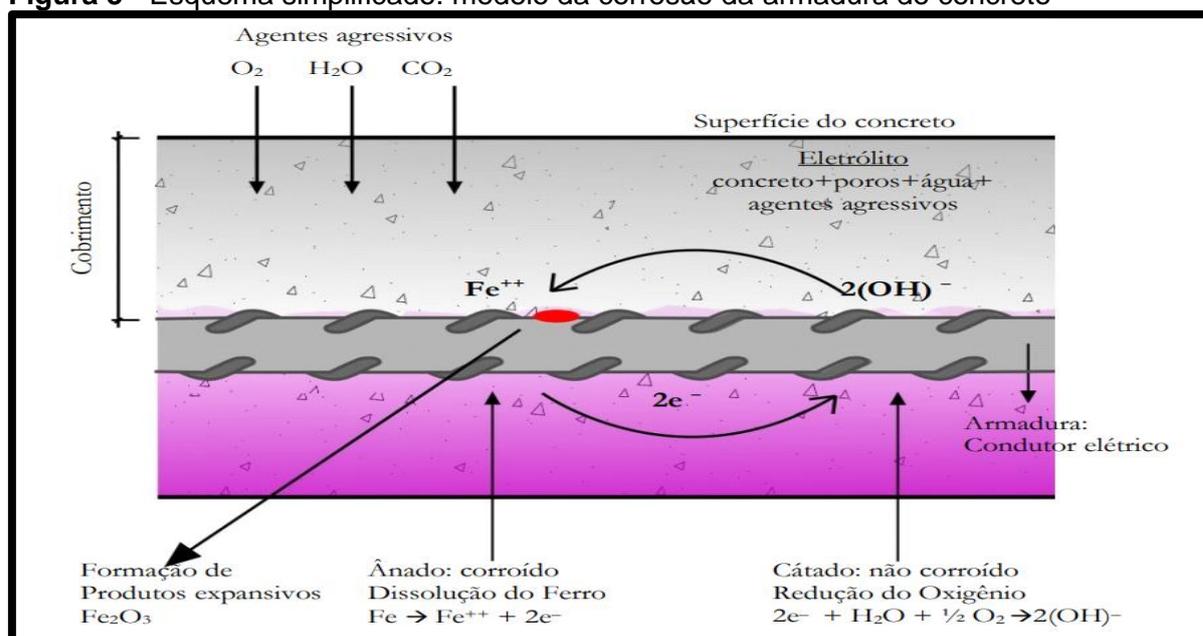
Quando a carbonatação ocorre em um concreto que tem cloretos, soma-se ambos efeitos agressivos, isso se deve ao fato que o efeito da ação do CO_2 sobre as fases sólidas do cimento, os cloroaluminatos podem desagregar e deixar livres os cloretos que mantinham combinados afirma (ANDRADE PERDRIX, 1992).

Helene (1993) cita três condições que devem existir para que a corrosão eletroquímica ocorra:

1. **Deve existir um eletrólito:** onde a água desempenha o papel de eletrólito, pois está sempre presente no concreto e maioria das vezes em quantidade suficiente para atuar como eletrólito (HELENE 1993);
2. **Deve existir uma diferença de potencial de eletrodo:** diferenças de umidade, de aeração, de concentração salina, de tensão no aço ou no concreto ou eventuais correntes de fuga ou pares galvânicos podem acarretar em diferença de potencial de eletrodo que se produz entre dois pontos da barra, desencadeando pilhas ou cadeia de pilhas de corrosão eletroquímica (HELENE, 1993);
3. **Deve existir oxigênio:** necessário pois é fundamental para a formação de ferrugem (HELENE, 1993).

Neste trabalho será apenas apresentado a corrosão eletroquímica e o modelo simplificado, sempre que a armadura estiver despassivada, tal como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Esquema simplificado: modelo da corrosão da armadura do concreto



Fonte: Possan, (2010).

Possan (2010) explica que as reações de oxidação do metal aconteceram na zona anódica, com a liberação de elétrons e perda de massa, onde é expressa pela Equação 02. Já na zona catódica acontece a redução do oxigênio dissolvido no eletrólito (ganho de elétrons), isso se dá em função da migração dos elétrons através do metal, não havendo perda de massa neste trecho (Equação 03):



Qualquer diferença de potencial entre as zonas anódicas e catódica acarreta o aparecimento de corrente elétrica e a ocorrência de corrosão dependerá da magnitude dessa corrente e do acesso do oxigênio, afirma (HELENE, 1993).

Possan (2010) descreve que na corrosão, os íons OH^- , formados pela reação de oxidação no cátodo, se movem através do eletrólito em direção ao ânodo, onde combina-se com os íons do metal (Fe^{2+}), assim formando os produtos de corrosão, neste caso o hidróxido de ferro $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$, conforme a reação simplificada da Equação 04



Helene (1993) afirma que não basta apenas saber em que condições pode ou não ocorrer a corrosão, mas é também fundamental saber a que taxa ou velocidade que essa corrosão pode dar-se. As reações eletroquímicas produzem e consomem elétrons, portanto, a melhor maneira de medir a taxa de corrosão é através da medida do fluxo de elétrons ou de íons, que é a corrente elétrica passante.

Não há corrosão em concretos secos, por insuficiência de eletrólito, nem em concretos totalmente saturados pois neste caso não haverá suficiente acesso de oxigênio. No caso do saturado ocorre quando o concreto está submerso sob uma pressão hidrostática superior a cerca de 0,0015 MPa (1.5 metro de coluna de água) segundo (HELENE, 1993).

Possan (2010) descreve que a corrosão possui característica expansivas (2 a 6,5 vezes superior ao volume da armadura) gerando tensões internas que podem chegar a 15 MPa, ocasionado fissuração do material, diminuindo a aderência da armadura ao concreto e além disso, essas tensões causam o destacamento e

desagregação do concreto, podendo em alguns casos, deixa a própria barra exposta ao ambiente.

A Helene (1993) que a corrosão pode ser classificada quanto ao seu aspecto e distribuição podendo-se chamar de corrosão generalizada, aquela que ocorre em toda uma região da barra, corrosão localizada, é mais rara e pode estar ligada geralmente a resultante de ação de cloretos ou fissuras e corrosão por pites devido a presença de cloretos.

3 METODOLOGIA

Para Prodanov (2013) Metodologia é uma disciplina que consiste em estudar, compreender e avaliar vários métodos disponíveis para a realização de uma pesquisa acadêmica. Em um nível aplicado, examina, descreve e avalia métodos e técnicas de pesquisa que possibilitam a coleta e o processamento de informações, no objetivo de encaminhar à resolução de problemas e/ou questões de investigação. A palavra Metodologia vem do grego “meta” = ao largo; “odos” = caminho; “logos” = discurso, estudo.

Já Salomon (2001) descreve a metodologia científica como metaciência, que trata do método científico e sua relação com o conhecimento científico, enquanto processo e produto, tanto em nível individual como em nível institucional.

3.1 Tipo de pesquisa

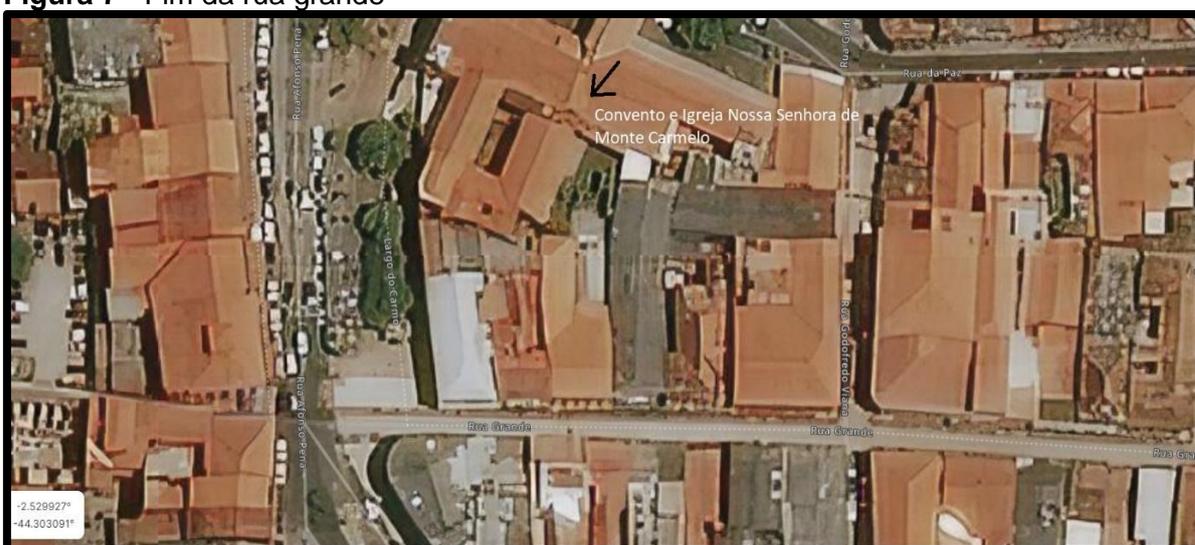
Este trabalho foi desenvolvido utilizando-se de uma metodologia de pesquisa de natureza aplicada, visando a melhoria na previsão e/ou compreensão de manifestações patológicas, para Prodanov (2013) a pesquisa aplicada tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.

Quanto aos objetivos é exploratório e descritivo, buscando maior familiaridade com o problema, através de revisão de literatura para o embasamento técnico e teórico, e descrever os resultados obtidos, Gil (2002) afirma que pesquisas exploratórias têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições; e a descritiva a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis.

Fonte: Areia Brasil LTDA, (2021).

O Comércio da Rua Grande tem o seu início entre as quadras 238 e 247 e prolongando-se no sentido entre as quadras 239 e 246, 240 e 245, com o seu término no fim da Rua Grande. A Rua Grande estende-se até encontrar com a Rua Afonso Pena, do lado direito da Rua Grande, findando, encontra-se o Convento e Igreja Nossa Senhora de Monte Carmelo, tal como pode ser observado na Figura 7.

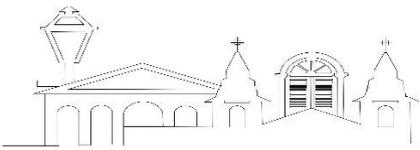
Figura 7 - Fim da rua grande



Fonte: *GoogleEarth*, (2021).

Atualmente a empresa que está à frente do processo de reforma é a Areia Brasil LTDA, o projeto arquitetônico é de autoria da arquiteta Paula Mendonça T. Cantanhede e o adotante é Marcos Antônio, tal como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Dados de adoção e projeto



NOSSO CENTRO



**GOVERNO DO
MARANHÃO**

SECID
SECRETARIA DAS CIDADES E DESENVOLVIMENTO URBANO
PROGRAMA ADOTE UM CASARÃO EDITAL 02/2020

TÍTULO DO SERVIÇO:
SERVIÇO TÉCNICOS ESPECIALIZADOS DE ELABORAÇÃO DE PROJETO EXECUTIVO DE ARQUITETURA E ENGENHARIA PARA REABILITAÇÃO DE IMÓVEL LOCALIZADO A RUA GRANDE, 176, SÃO LUIS- MA

ENDEREÇO DA OBRA:
RUA OSWALDO CRUZ (RUA GRANDE), N° 767 - CENTRO

ADOTANTE:
MARCOS ANTÔNIO MATIAS SILVA ME

ZONA	ZPH	ÁREA CONSTRUIDA TOTAL	ZPH
ATME	NA	ÁREA OCUPADA no SITE	757,62m ²
ALML	NA	ÁREA LIVRE	ZPH
AP	NA	PISO 0 70,00m ² PISO 1 700,00m ² PISO 2 143,00m ² TOTAL 2.143,00m ²	Quadro Geral
ÁREA TERRENO 1.111,22m ²			



TRIL ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO LTDA

RUA DA PAXIUBA, 1044, CENTRO, ZÉ DOCA- MA
TEL. (98) 98147-0744
e-mail: tril_arquitetura@gmail.com

PROJETO BÁSICO DE ARQUITETURA

ARQUITETA URBANISTA: PAULA MENDONÇA T. CANTANHEDE - CAU/MA: A89617-9	ENGENHEIRO CIVIL:
PROJETO: SHOPPING RUA GRANDE	LOCAL DO PROJETO: RUA GRANDE, N° 767 - CENTRO
DESENHISTAS: PAULA MENDONÇA MAYSA MACEDO	DATA DE EMISSÃO: FEVEREIRO/2020
	ESCALA: 1/75
ESPECIFICAÇÃO DA PRANCHETA: COBERTURA, SITUAÇÃO E IMPLANTAÇÃO	OR. COEF.:
	FORMATO: A1
	PRANCHETA: 04/10

Fonte: Areia Brasil LTDA, (2021).

Na Figura 8 é possível ter acesso aos dados de adoção, arquitetura e da localização do edifício. O prédio da Seduc antes da adoção já estava abandonado e com manifestações patológicas visíveis, tal como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Vista da fachada



Fonte: Acervo do autor, (2021).

Na Figura 9 é possível observar desagregação de concreto em vigas e pilares, desagregação da pintura e que a edificação está com vários indicadores de abandono. O projeto arquitetônico do Shopping Rua Grande conserva, em grande maioria, os elementos atuais da fachada, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Apresentação fachada Shopping Rua Grande



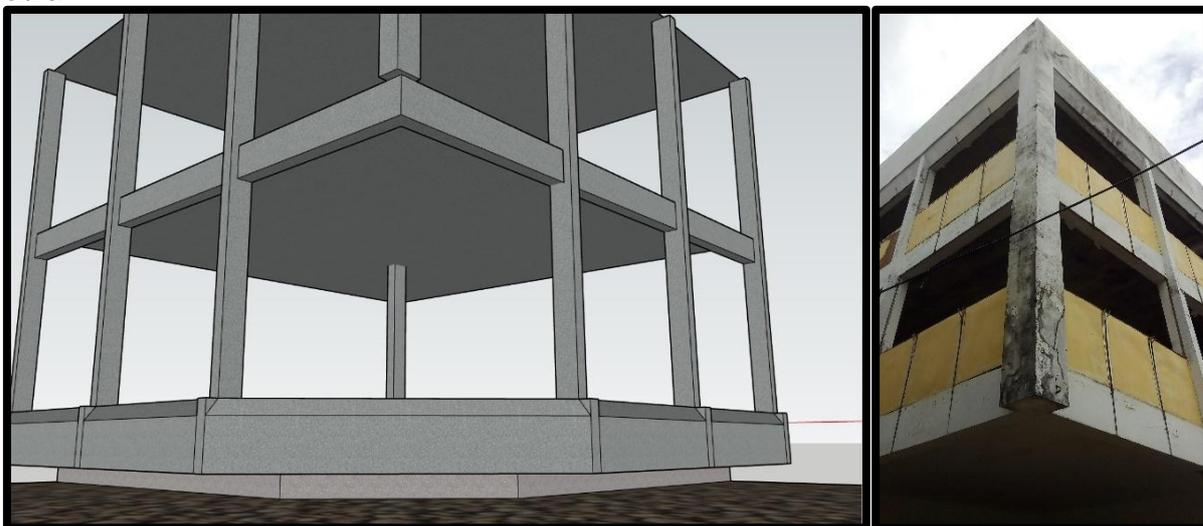
Fonte: Areia Brasil LTDA, (2021).

O Shopping Rua Grande representa um local onde vai reunir em um só lugar culinária, artesanato, oficinas, lojas, shows e diversão, uma representação comercial que faltava na rua grande (AGÊNCIA DE NOTÍCIAS – GOV.MA, 2021). Para referência direcional, quando no presente trabalho for citado por exemplo: lado esquerdo, será sempre mentalizada a Figura 10 para o direcionamento.

3.3 Caracterização do antigo edifício da Seduc

Alguns elementos chamam atenção, principalmente na arquitetura da edificação, o/os arquiteto(s) ousaram em como o prédio seria visto, dando uma ideia de que não estivesse tocando o chão, suspenso a 30cm do solo, outro elemento ousado são os pilares dos cantos, na parte traseira da edificação, que são suprimidos no pavimento térreo e nascendo no segundo pavimento na junção de duas vigas em balanço, às que neles deveriam estarem apoiadas. tal como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Modelagem do canto esquerdo traseiro da edificação no *Sketchup* e imagem na obra

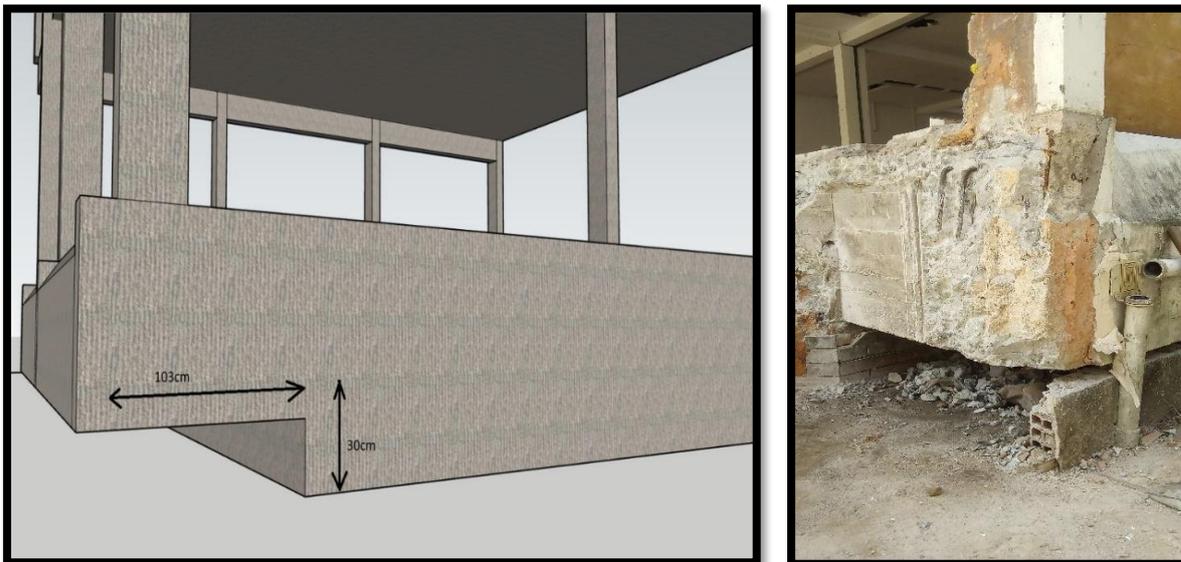


Fonte: Elaborada pelo autor, (2021).

A Figura 11 Primeira - Imagem não representa a edificação como um todo, é apenas uma demonstração da parte do fundo, do lado esquerdo, mas que está com todas as medidas retiradas do projeto e verificadas em campo. A edificação é apoiada em uma espécie base de concreto, não há informação se a mesma é a fundação ou se há a junção com blocos e/ou estacas no solo, o que pode ser verificado é uma base

de concreto em contato com o solo com pé direito de 30cm, a partir disto é projetado vigas em balanço de 103cm, onde suas pontas servem de apoio para os pilares das extremidades da edificação, tal como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Detalhamento da edificação em contato com o solo no *Sketchup* e representação na obra



Fonte: Elaborada pelo autor, (2021).

No entanto, esse modelo arquitetônico, com o tempo, demonstrou uma deficiência na parte da limpeza embaixo da edificação, por ter apenas 30cm de pé direito e um recuo de 103cm, e por ser um bom esconderijo para animais peçonhentos. Na edificação tem uma parede de vedação contendo apenas uma fiada de alvenaria tampando essa abertura, entre a edificação e o solo, não se sabe, ao certo, se ela está ali dez do projeto ou se foi uma medida paliativa, já que há uma quantidade expressiva de lixo embaixo, tal como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Fiada de alvenaria para vedação e lixo embaixo da edificação



Fonte: Acervo do autor, (2021).

No projeto do Shopping tem uma área de expansão, localizada entre o muro do fundo do terreno e o fundo da edificação, onde no processo de execução, para preparação do solo para fundação, foi removido a fiada de alvenaria que tampa os 30 cm entre o solo e a edificação, está não tampa totalmente ficando um espaço de aproximadamente 6 cm como pode ser observado na Figura 13 - Primeira Imagem. Com a retirada da fiada foi possível evidenciar o acúmulo de lixo Figura 13 - Segunda Imagem, por isso é bem provável que este mecanismo de vedação (fiada de alvenaria) não estaria no projeto inicial.

Outra característica que chama atenção, mas não é arquitetônica e sim de material empregado, é uma camada de reboco, evidenciada em alguns elementos estruturais internos e com menor ocorrência em externos, que utiliza uma massa diferente do convencional, a massa de cimento para reboco é naturalmente cimento, agregado miúdo (é comum utilizar areia lavada peneirada) e em alguns casos aditivo, no entanto a da edificação parece ter trocado o agregado miúdo por barro de coloração amarelada, tal como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Camada de reboco



Fonte: Acervo do autor, (2021).

Na Figura 14 – Primeira Imagem é possível evidenciar alguns pilares e vigas com a camada de reboco, ela está presente em todos os elementos estruturais internos que são visíveis e em alguns externos, essa camada em sua maioria varia entre 2 a 3 cm, alguns casos excepcionais 5 cm, exemplo da Figura 14 – Segunda Imagem. Apesar do aglomerante ser de fácil desintegração, como pode ser visto na Figura 14 Terceira – Imagem, onde uma amostra aglomerada foi esfregada entre os dedos e desintegrou facilmente, fez-se necessário a utilização de um martelo elétrico para desagrega-los dos elementos estruturais, estes que são de concreto convencional.

3.4 Caracterização das manifestações patológicas

As manifestações patológicas associadas à pintura estão presentes em toda a edificação. Já às relacionadas ao concreto armado é presente em alguns elementos estruturais, umas com características visuais e outras estruturais, tal como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Manifestações patológicas em viga, pilar e laje



Fonte: Acervo do autor, (2021).

A Figura 15 representa três elementos estruturais do antigo edifício da Seduc, pilar, viga e laje, nos pilares, dos registros feitos, é mais característica visual, já às vigas, em várias, estão com armadura exposta, característica do efeito da corrosão devido a carbonatação do concreto, já às lajes, às inspecionadas visualmente, todas estão com armaduras exposta, no entanto, no ensaio realizado com fenolftaleína, o melhor resultado obtido, referente à frente de carbonatação do concreto, foi na laje, o que será detalhado no tópico de resultado e discussões.

3.5 Ensaio com Fenolftaleína

O ensaio consiste em aplicar a fenolftaleína no concreto para verificar a frente de carbonatação, devido o diferencial de potencial do concreto carbonatado e não carbonatado, com isso o indicador de pH altera de cor, onde pH abaixo de 8 é incolor e acima disto é vermelho-carmim, tal como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Fenolftaleína utilizada no estudo



Fonte: Acervo do autor, (2021).

É comum encontrar a substância em pó e que para esse caso há uma norma para o seu preparo, UNE 112-011-94 (1994), no entanto a utilizada neste estudo é da Figura 16– Primeira Imagem, que já está pronta para aplicação. A Figura 16 – Segunda Imagem é o teste realizado na obra aplicando em uma massa de reboco recentemente assentada, em um pilar, como a massa não está carbonatada a mudança de coloração foi imediata, onde a substância respingou, devido ao elevado pH da massa de cimento.

Os elementos estruturais do ensaio da frente de carbonatação foram pilares, vigas e lajes, alguns destes situados no pavimento térreo e, em sua grande maioria, no primeiro pavimento, pois o térreo já estava em fase de restauração avançada. Foram aproveitados os pontos onde o concreto estava desagregado e expondo a armadura, alguns já se encontravam nessa situação antes mesmo da reforma e outros foram ocasionados devido ao atrito do martetele elétrico na remoção da camada de reboco. A reforma não estava utilizando escoramento, por isso a decisão de aproveitar os pontos de armadura exposta, optou-se por não ocasionar atrito desnecessário na estrutura, já que o objeto de estudo estava exposto em vários locais.

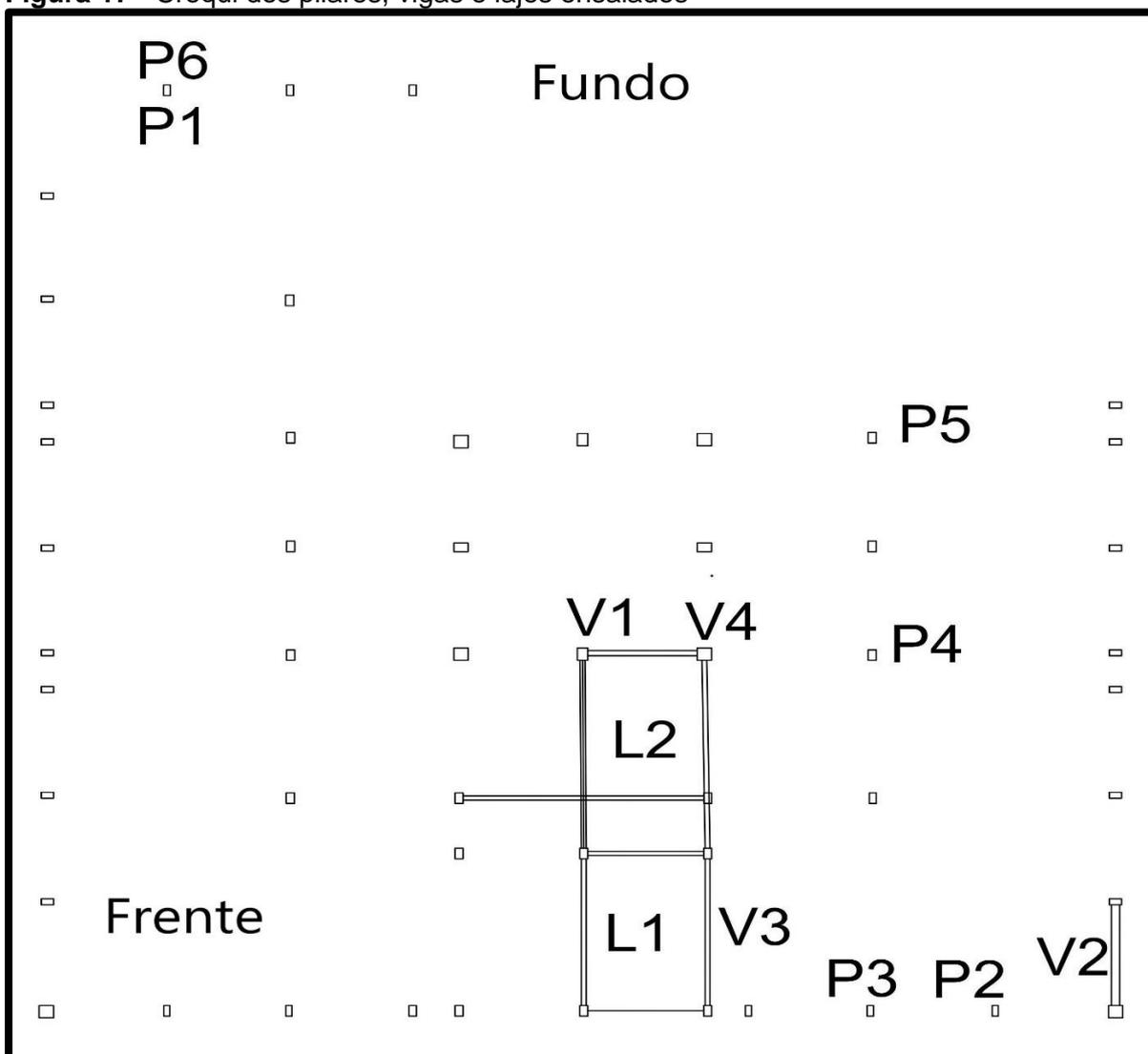
No entanto, é preciso um cuidado especial, pois ao aplicar a Fenolftaleína nestes pontos é provável que o resultado não seja o esperado, devido ao tempo de

exposição ao ambiente, com isso é removida uma camada superficial de concreto antes da aplicação, entre 1 a 2 cm, com auxílio de uma marreta e uma talhadeira

O ensaio consiste em remover uma camada do concreto de cobrimento da armadura, aplicar a fenolftaleína e medir, em milímetros, a penetração da carbonatação, com esse dado é possível determinar o valor de “k” da equação (1) para depois determinar a vida útil da edificação.

O fator determinante na escolha dos elementos estruturais foi um ponto de armadura exposta, em dois casos foram rompido o concreto até na armadura, pois estavam localizados mais centralizados na edificação e não tinham a armadura exposta, a ideia seria analisar elementos próximos das áreas externas e mais distantes também. Foi elaborado um posicionamento destes elementos com base na planta baixa, tal como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Croqui dos pilares, vigas e lajes ensaiados



Fonte: Elaborada pelo autor, (2021).

A Figura 17 foi elaborada da planta baixa do edifício cedida pela empresa Areia Brasil LTDA, foi retirada as linhas representativas das vigas que não foram objeto de ensaio e os pilares do lado direito, pois não tem contato com os elementos analisados, alguns objetos de ensaio estão com duas marcações, isso se deve a estarem em pavimentos diferentes.

As numerações seguem as ordens de ensaios devidas por elementos pilares (P1, P2, ... e Pn), assim para às vigas (V) e lajes (L). No total foram 12 ensaios.

3.5.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados foram a Fenolftaleína, já citada, um par de luva de látex, ideal para proteção contra agentes químicos, óculos transparentes, marreta, talhadeira, trena de três metros, pincel e um borrifador de água, tal como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Materiais utilizados



Fonte: Acervo do autor, (2021).

As luvas e o óculos são matérias de proteção, muito importante a utilização para o manuseio e aplicação do produto, a marreta e a talhadeira para retirada da camada de concreto, o pincel para remover o material solto, a treina para verificar a espessura do cobrimento da armadura e o avanço da carbonatação, muito importante essas verificações, e o borrifador de água para aplicar a Fenolftaleína no ponto selecionado.

3.5.2 Ensaio dos pilares

Todos os pilares analisados estavam carbonatados, os pilares P1 e P4 apresentaram algumas manchas indicando um pH igual ou maior que 8, tal como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Pilares P1 e P5



Fonte: Acervo do autor, (2021).

As imagens estão na ordem da chamada do título, no pilar P1, pavimento térreo, foi removido uma camada para aplicação da Fenolftaleína, no entanto já estava desagregado o cobrimento da armadura, já o pilar P5, primeiro pavimento, foi retirado

todo o revestimento até chegar na armadura. Os pilares P2, P3, e P6 também já estavam com armadura exposta, tal como pode ser observado na Figura 20.

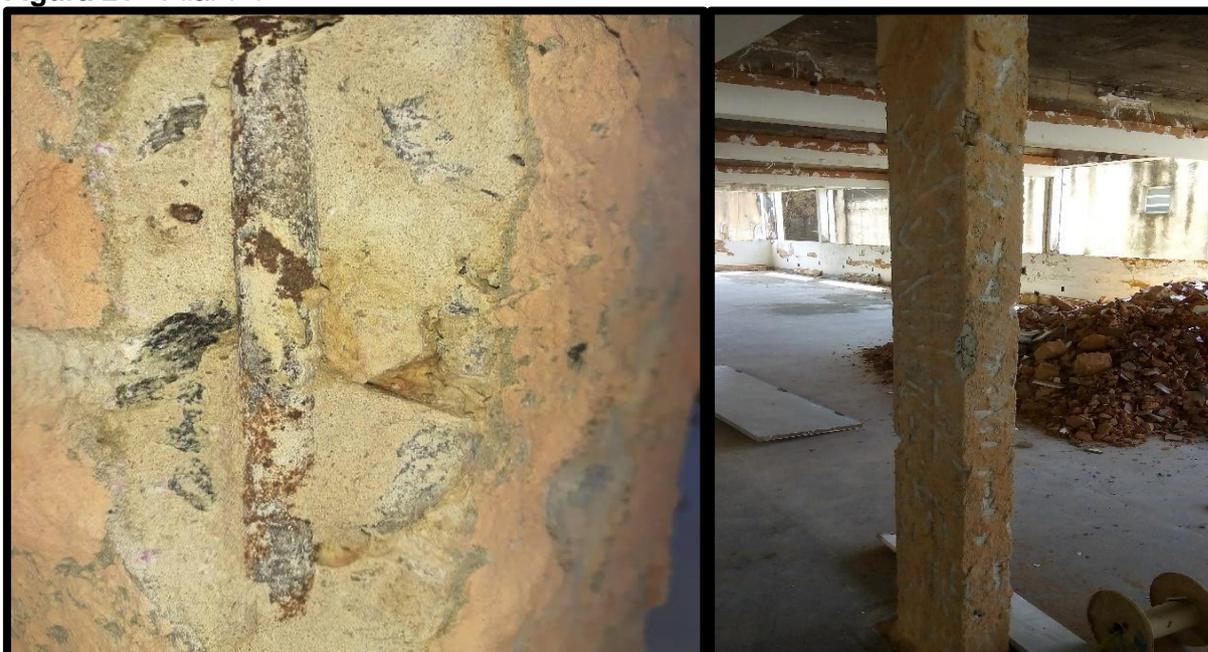
Figura 20 - Pilares P2, P3 e P6



Fonte: Acervo do autor, (2021).

As imagens estão na ordem da chamada do título, os 3 estão situados no primeiro pavimento, os procedimentos foram os mesmos, remover uma camada de 1 a 2cm com a marreta e talhadeira, limpar o local e aplicar Fenolftaleína. Os pilares P4 e P5 são os centralizados, onde foi removido o revestimento da armadura, o pilar P4 também estava carbonatado, tal como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Pilar P4



Fonte: Acervo do autor, (2021).

O pilar P4 também está situado no segundo pavimento. Apesar de todos os pilares estarem carbonatados a força necessária para romper, o cobrimento ou até mesmo para retirar 1 a 2 cm de onde já está rompido, é grandiosa e um trabalho exaustivo.

3.5.2 Ensaio das vigas

Todas as vigas analisadas também estavam carbonatadas, mas a Viga V1 apresentou uma área com o pH acima de 8 próximo a armadura, tal como pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 - Viga V1



Fonte: Acervo do autor, (2021).

A viga V1 situada no pavimento térreo, os procedimentos foram os mesmos adotados até o momento e ela já estava com o cobrimento da armadura desagregado, esta apresentou uma camada parcial não carbonatação, no entanto essa camada é insignificante para determinar a frente de carbonatação, pois já ultrapassou a armadura. O ensaio nesta viga foi realizado em três pontos, o da Figura 21

centralizado e os outros dois nos cantos esquerdo e direito do cobrimento desagregado da armadura, tal como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Lado esquerdo e direito da figura 22



Fonte: Acervo do autor, (2021).

Na Figura 23 – Primeira Imagem está sinalizado, com setas, onde a Segunda e Terceira Imagens situam-se. A Segunda Imagem representa o lado esquerdo do cobrimento da armadura desagregado, é possível notar algumas manchas, no entanto próximo da armadura o concreto está carbonatado. A Terceira Imagem, no lado direito, não apresentou manchas. As vigas V2, V3 e V4 totalmente carbonatadas, tal como pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - Vigas V2, V3 e V4



Fonte: Acervo do autor, (2021).

As três vigas estão situadas no primeiro pavimento, às vigas, exceto a V3, estão próximas aos ambientes externos, V1 e V4 pode não parecer, pois verificando a Figura 17 estão centralizadas no croqui da edificação, no entanto, aquela parte é uma área aberta, isso pode ser observado na Figura 23, notem que tem vegetação crescendo nos elementos estruturais e na Figura 22 – Segunda Imagem é possível observar, no canto esquerdo inferior, uma cisterna.

3.5.3 Ensaio das Lajes

O ensaio nos elementos de lajes foi apenas em dois pontos, às lajes L1 e L2, a L1 apresentou alguns fragmentos de pH acima de 8, como a laje tem apenas 9cm de espessura, verificado no projeto, foi retirado do cobrimento da armadura uma camada fina, tal como pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Laje L1



Fonte: Acervo do autor, (2021).

A parte de cobrimento que foi retirada é próximo da armadura, mas em algumas partes distantes apresentou, de forma tímida, um pH elevado, como já descrito, as lajes foram onde apresentaram os melhores resultados, se comparado com pilares e vigas, onde foram removidos 2 a 3 cm de cobrimento, a L1 apresenta

melhores condições, no entanto a grande surpresa é a L2, tal como pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 - Laje L2



Fonte: Acervo do autor, (2021).

Na L2 os procedimentos foram os mesmos da L1, sendo o último ensaio realizado, a princípio foi aplicado a fenolftaleína próximo a região da armadura exposta, a reação foi imediata, então foi realizada a aplicação em toda a área vista nas imagens, o que chama atenção, pois essas lajes já estavam expostas algumas semanas, levando em consideração a retirada do forro para critério de exposição, mas na verdade, exposta estão dez de sua execução.

3.5.4 Dados dos pilares, vigas e lajes

Este tópico é para abordar as espessuras de cobertura da armadura de cada elemento do ensaio, posição em relação ao pé direito para pilares, tal como pode ser observado no Quadro 6.

Quadro 6 - Espessura do cobrimento da armadura e pé direito

Elementos	Cobrimento (cm)		

	<Dimensão	>Dimensão	Pé Direito (cm)
P1	2,0	1,5	96
P2	1,0	2,5	107
P3	2,0	1,0	103
P4	1,5	1,0	106
P5	1,5	1,0	81
P6	1,5	1,0	130
V1	2,0	1,4	---
V2	2,5	0,7	---
V3	2,5	2,3	---
V4	2	1,5	---
L1	---	---	---
L2	---	---	---
< - Maior > - Menor			

Fonte: Elaborado pelo autor, (2021).

O Quadro 6 demonstra as dimensões de cobertura da armadura de todos os pilares e vigas verificados em campo, as lajes não teve a verificação de cobertura da armadura, para os pilares a posição do ensaio é determinado pelo pé direito, medida entre o piso e o local de ensaio, as vigas foram todas no meio do vão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A princípio a expectativa seria de encontrar alguns elementos parcialmente carbonatados, no entanto, com exceção da laje L2, todos os elementos estavam totalmente carbonatados, o que para Helene (1993) a edificação já atingiu a vida útil de projeto.

Infelizmente não pode ser verificado as condições iniciais da estrutura, pois ao definir o local de estudo já estava em processo de reforma, mas alguns destes elementos estruturais citados no presente trabalho, referente às condições de exposição da armadura devido a desagregação da camada de cobertura da armadura, não estavam nessas condições, foram provocados devido ao processo de desagregação da camada de reboco, por esse motivo a expectativa.

Em uma análise visual, esquecendo a aplicação da Fenolftaleína, poderia esperar um resultado satisfatório apenas da viga V3, pois está não apresenta início de corrosão, os pilares P4 e P5 apresenta um quadro um pouco diferente também dos demais, mas é visível o início de corrosão.

Comparando as características citadas na base do estudo (referencial teórico) com o evidenciado em campo pode, com ressalvas, afirmar que a carbonatação do concreto influenciou a corrosão das armaduras, visto que os efeitos são muitos parecidos com os das literaturas, que é de corrosão generalizada, no entanto cabia uma verificação dos teores de cloreto, no intuito de avaliar se há reação em conjunto.

Não foi possível acesso a um dado oficial referente a data de construção da edificação, mas de forma empírica, com base no Quadro 5 de Helene (1993) e os resultados de campo, suponha que a classificação do concreto da obra seja “normal”, logo teria um coeficiente de carbonatação entre 3 a 6 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{1/2}$, a profundidade de carbonatação provável em 15 anos é 22mm e em 50 anos 40mm. Todos os elementos estruturais do ensaio obtiveram uma profundidade de carbonatação acima de 25mm, e não apresentaram sinais que teria uma área não carbonatada à frente, o que pode ser bem mais que 25mm. O concreto da edificação apresenta uma alta qualidade.

Segundo o encarregado da empresa Areia Brasil LTDA o edifício teria por volta de 50 anos, o que é compreensível, mesmo removendo o cobrimento da armadura, não apresentar áreas não carbonatadas, pois a profundidade da carbonatação estaria em torno de 40mm, isso se comparar com o Quadro 5 de Helene (1993), levando em consideração a qualidade do concreto “normal”.

O caso da Viga V1 que apresentou uma área não carbonatada próximo a armadura será detalhada através de uma figura, tal como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Viga V1 e corte transversal



Fonte: Acervo do autor, (2021).

A Figura 27 - Segunda Imagem representa um corte transversal na seção da viga V1, e onde a seta indica, de forma representativa, é área que apresentou um pH acima de 8, o restante é apenas uma suposição, pois a carbonatação se dá de fora para dentro, logo a área central estará com o pH normal do concreto.

Os ensaios não foram de uma forma global ou simétrica da edificação, concentrou-se mais na parte frontal, no entanto essa amostra concentrada chama atenção, pois muitos elementos estão em processo de corrosão avançado e que vai continuar, os pilares P2, P3, vigas V1, V2, V3 e, em especial, a V4 necessitam de uma avaliação para determinar a velocidade de corrosão, assim determinar o melhor processo de restauração com base na expectativa da nova vida útil, a V4 já estava no processo de perda de área de aço, tal como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - V4 perda de área de aço



Fonte: Acervo do autor, (2021).

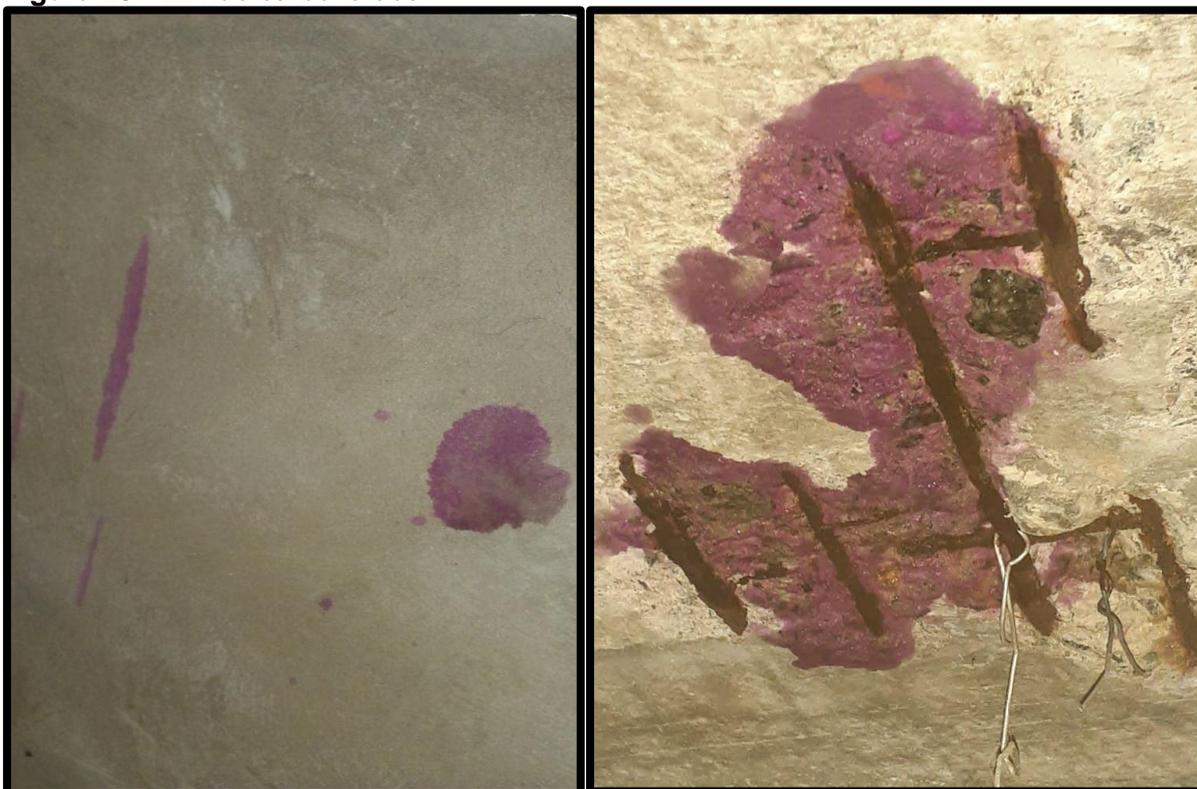
Apesar da Figura 28 – Primeira Imagem está diferente da apresentada anteriormente da viga V4, esta foi registrada antes de aplicar a Fenolftaleína, é possível visualizar a perda de área de aço, com os dedos e sem esforços foram removidas ferrugens da armadura corroída, tal como pode ser visto na Figura 28 – Segunda Imagem.

A laje L2 foi a grande surpresa, como que em uma estrutura toda carbonatada um elemento, entre 12 amostras, sairia tanto da curva, bem para tentar entender será resgatado lá do referencial teórico as três condições para que a corrosão eletroquímica ocorra segundo Helene (1993):

- Deve existir um eletrólito;
- Deve existir uma diferença de potencial de eletrodo;
- Deve existir oxigênio.

No projeto atual da edificação um banheiro é situado na área correspondente a L2, para tentar entender o que ocorreu será feito uso de duas imagens, tal como pode ser observado Figura 29.

Figura 29 - L2 não carbonatada



Fonte: Acervo do autor, (2021).

Primeiro ponto a Figura 29 – Primeira Imagem é a massa de cimento de teste da Fenolftaleína, descrito bem no início do ensaio, ela aparenta estar com o pH mais baixo que da L2, mas ambos acima de 8, essa percepção é por conta da intensidade da cor, o que faz sentido se olhar para o lado de qualidade, uma massa feita para reboco é menos criteriosa que um concreto para elementos estruturais.

Como a armadura da laje está exposta os três fatores que devem existir da corrosão eletroquímica estão presentes, pois a armadura está correndo, é possível que a carbonatação do concreto não esteja presente neste elemento estrutural devido o forro de gesso, que no processo de reforma foi retirado, impedindo a penetração de CO₂ ou por falta de umidade, a umidade poderia ser suficiente para ocasionar a corrosão, mas não para a difusão do CO₂. Este concreto da L2 representa o pH da edificação no dia que foi concretado, se não igual, mas próximo disso.

Em relação ao cobrimento da armadura, dos elementos estruturais analisados, estão todos fora dos padrões da norma NBR 6118 (ABNT, 2004), a norma recomenda para laje um cobrimento mínimo da armadura de 25mm, as lajes apesar de não terem sido verificadas, é visível a proximidade da armadura a superfície do concreto de cobrimento. Para pilares, vigas e elementos estruturais em contato com o solo a recomendação é 30mm, certo que 6118 de 2004 é recente, mas normas passadas já trabalhavam com esses valores, exemplo a NBR 6118 (ABNT, 1978) já determinava o cobrimento de vigas e pilares para ambientes urbanos de 30mm. Algumas medidas dos elementos estruturas do ensaio estavam abaixo da metade do valor recomendado pela a norma, NBR 6118 de 2004 e 1978, exemplo a viga V3 que na sua menor dimensão o cobrimento da armadura é de apenas 10mm, no entanto, a armadura no ponto verificado, da V3, não estava sofrendo corrosão.

5 CONCLUSÃO

Entender os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto não é de simples compreensão, uma série de eventos que vários autores ao longo dos anos vêm tentando apresentar de forma simplificada, mas que sejam efetivos. O presente estudo apresenta um apurado das principais literaturas para descrever um dos eventos que é a corrosão da armadura devido a carbonatação do concreto pela difusão do gás carbônico (CO₂) e um estudo de campo para prática do conteúdo apresentado.

A literatura é bem precisa quanto aos cuidados com a qualidade do concreto, fator água/cimento, cobrimento da armadura, porosidade do concreto, e entre outros fatores, mesmo que a frente de carbonatação chegue até a armadura, seguindo os procedimentos normativos, o risco da estrutura colapsa prematuramente é mínimo.

A verificação da frente de carbonatação é importante pois fatores como execução, matérias empregados, descuido e projeto podem afetar na vida útil da edificação e o colapso de uma estrutura nem sempre é visível, é preciso determinar o avanço da frente de carbonatação e no caso de corrosão determinar a sua capacidade. Para que a corrosão ocorra são necessários três mecanismos, se um por ventura não existir não haverá corrosão, trabalhar em cima destes fatores é fundamental.

O antigo edifício da Seduc tem alguns elementos que exigem um cuidado mais rigoroso, mas isso é com base no plano de utilização da edificação, o ensaio realizado não é fator preponderante para determinar os riscos destes elementos, no entanto, a edificação está sendo preparada para utilização de 10 anos e com possibilidade de renovar por mais 5 anos, uma avaliação para essa condição deveria ser feita, não para o fator vida útil de projeto e vida útil de serviço, que é quando começa a despassivação da armadura, corrosão, fissuras e queda de pedaços de concreto, o que já estavam ocorrendo, mas para o fator vida útil total, período de tempo que vai até a ruptura e colapso parcial ou total da estrutura.

REFERÊNCIAS

Adote um casarão: construção do Shopping Rua Grande gera empregos e recupera imóvel no centro de São Luís. **Agência de notícias – Governo do Maranhão**, 2021. Disponível em: <https://www.ma.gov.br/agenciadenoticias/?p=298519>. Acesso em: 30, maio de 2021.

ANDRADE PERDRIX, M. C. Conceitos Básicos sobre corrosão de armaduras. *In*: ANDRADE PERDRIX, M. C. **Manual para Diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini. 1992. Tradução e adaptação Antonio Carmona e Paulo Helene. 32 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 1978. Rio de Janeiro. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 2004. Rio de Janeiro. 03-19 p.

BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto armado**. Disciplina: 1288 – Estruturas de concreto I, notas de aula, 2006. Bauru – São Paulo. 98 p.

BOLINA, F. L. TUTIKIAN, B. F. HELENE, P. Patologia das construções. *In*: BOLINA, F. L. TUTIKIAN, B. F. HELENE, P. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 08 - 57 p.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2005. 08 p.

CARVALHO, R. C. FIGUEIREDO FILHO, J. R. Introdução ao estudo das estruturas de concreto armado. *In*: CARVALHO, R. C. FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2015. 21 p. Disponível em: https://www.academia.edu/36103093/Calculo_e_Detalhamento_de_Estruturas_Usuais_de_Concreto_Armado_4ed_Carvalho. Acesso em: 24 de maio 2021.

CERQUEIRA, R. Problema em apoio pode ter provocado queda de viaduto em SP, diz especialista. **Globo News – São Paulo**. 2018 Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/11/15/especialista-diz-que-problema-em-apoio-provocou-queda-de-viaduto-em-sp.ghtml>. Acesso em: 22, maio 2021.

COÊLHO, R. S. A. Introdução. *In*: COÊLHO, R. S. A. **Concreto armado na prática**. São Luís: UEMA, 2008. 21 – 22 p. Disponível em: <https://www.editorauema.uema.br/wp-content/uploads/files/2018/02/livro-concreto-armado-na-pratica-ronaldo-sergio-1519142039.pdf>. Acesso em: 23 maio de 2021.

DE CASTRO BOLINA, C. CASCUDO, O. Inibidores de corrosão: análise da eficiência frente à corrosão do aço induzida por cloreto e carbonatação em meio aquoso. 2013. **ENGEVISTA**, V. 15, n.1. 82 f.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013. 22 p.

GIL, A. C. Como classificar as pesquisas. *In: Como elaborar projeto de pesquisa*. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002. 41 - 56 p.

FIGUEIREDO, E. P. MEIRA, G. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. México: **Boletim técnico ALCONPAT Internacional**, v. 6, 2013. 29 p.

HELENE, P. A. Nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto. *In: IV congresso ibero-americano de patologia das construções anais*. Porto Alegre, RS 1997. 04 p. Disponível em: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/185.pdf>.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. 230 p.

MOTA, J. M. F. et al. **Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto**. 2012. Anais do 54º congresso brasileiro do concreto, Maceió – Alagoas, 2012. 8 f

NEVILLE, A. M. Cimento Portland. *In: NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto*. São Paulo: BOOKMAN, 2016. 01 p.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. 66 - 86 p.

PRODANOV, C. C. Metodologia: método científico. *In: PRODANOV, C. C. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. 2 ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 14 p.

SALOMON, D. V. Introdução. *In: SALOMON, D. V. Como fazer uma monografia*. 10 ed. São Paulo: Martins Fontes, 2001. 8 p.

SOUZA, V. C. M. RIPPER, T. Patologia das estruturas de concreto. *In: SOUZA, V. C. M. RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: Câmara Brasileira do livro, 2009. 13-71 p.

TRINDADE, D. S. **Patologia em estrutura de concreto armado**. 2015. 18 p. Orientador: Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos. Trabalho de conclusão de curso (Graduação Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/2_2015/TCC_DIEGO%20DOS%20SANTOS%20DA%20TRINDADE.pdf. Acesso em: 21 out. 2020.

ANEXO

ANEXO A – Autorização de pesquisa

