

CENTRO UNIVERSITÁRIO BRASILEIRO - UNIBRA

CURSO DE GRADUAÇÃO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

CELSO VIEIRA SILVA FILHO  
DAVID CARLOS MARTINS DA COSTA  
JACICLEIDE DOS SANTOS SILVA

**PATOLOGIAS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: ANÁLISE DE COMO A CARBONATAÇÃO  
ACELERA O PROCESSO DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO ARMADO**

Recife  
2023

CELSON VIEIRA SILVA FILHO  
DAVID CARLOS MARTINS DA COSTA  
JACICLEIDE DOS SANTOS SILVA

**PATOLOGIAS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: ANÁLISE DE COMO A CARBONATAÇÃO  
ACELERA O PROCESSO DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO ARMADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA,  
como requisito parcial para obtenção do título  
de bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Janilson Alves Ferreira

Recife  
2023

Ficha catalográfica elaborada pela  
bibliotecária: Dayane Apolinário, CRB4- 2338/ O.

S586p

Silva Filho, Celso Vieira.

PATOLOGIAS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: análise de como a carbonatação acelera o processo de deterioração do concreto armado/ Celso Vieira Silva Filho; David Carlos Martins da Costa; Jacicleide dos Santos Silva. - Recife: O Autor, 2023.

23 p.

Orientador(a): Dr. Janilson Alves Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA. Bacharelado em Engenharia civil, 2023.

Inclui Referências.

1. Carbonatação. 2. Aderência. 3. Manifestação patológica. I. Costa, David Carlos Martins da. II. Silva, Jacicleide dos Santos. III. Centro Universitário Brasileiro. - UNIBRA. IV. Título.

CDU: 624

## Resumo

Neste trabalho serão apresentadas as características da patologia da carbonatação, assim como sua manifestação, principal causadora da perda de aderência entre concreto e armação, que por sua vez gera a redução da seção do concreto armado. Tal patologia se dá devido à diminuição do pH dos materiais cimentícios do concreto, que é causado pela reação físico-química entre os compostos hidratados do cimento e o gás carbônico encontrado na atmosfera. Também será apresentado um estudo da manifestação patológica que, por sua vez, foi identificada na estrutura de um shopping, com mais de 35 anos de sua construção, localizado na cidade de Recife, Pernambuco. A partir disto, será estudado outro laudo de carbonatação de um edifício residencial também localizado na cidade de Recife que data de mais de 30 anos de sua construção. As eventuais consequências do surgimento da patologia serão abordadas, como também as medidas adotadas para resolução do problema identificado com ensaios práticos e laudos que concretizam os resultados obtidos. Após a elaboração dos dados constatados em campo e através dos estudos propostos, será realizado um paralelo entre as diferenças dos fenômenos de reação identificadas nos dois empreendimentos.

**Palavras-chave:** Carbonatação. Aderência. Manifestação patológica.

## **Abstract**

In this work, we will present the characteristics of carbonation pathology, as well as its manifestation, the primary cause of adhesion loss between concrete and reinforcement, which in turn leads to the reduction of the reinforced concrete section. This pathology occurs due to the decrease in pH of the cementitious materials in concrete, caused by the physicochemical reaction between cement hydrated compounds and carbon dioxide present in the atmosphere. A study of this pathological manifestation is provided, which was identified in the structure of a shopping mall constructed over 35 years ago, located in the city of Recife, Pernambuco. Subsequently, another carbonation assessment of a residential building, also located in the city of Recife and dating back over 30 years from its construction, will be examined. The potential consequences of the emergence of this pathology will be discussed, as well as the measures taken to address the identified issue through practical tests and reports that substantiate the results obtained. After compiling the field-collected data and the proposed studies, we will draw a comparison between the differences in the reaction phenomena identified in the two developments.

**Keywords:** Carbonation. Adherence. Pathological manifestation.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>8</b>
2.1	Objetivo geral . . . . .	8
2.2	Objetivos específicos . . . . .	8
2.3	Justificativa . . . . .	8
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> . . . . .	<b>9</b>
3.1	Concreto armado . . . . .	9
3.2	Patologias e suas características . . . . .	10
3.3	Carbonatação e a degradação do concreto . . . . .	12
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>16</b>
4.1	Local do estudo de caso . . . . .	16
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>19</b>
5.1	Área de Estudo 1 . . . . .	19
5.2	Área de Estudo 2 . . . . .	23
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>28</b>
	<b>Referências</b> . . . . .	<b>29</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A revista “Concreto & Construções”, edição 53 (2009), informa que o uso do concreto pela humanidade remonta a muitos séculos, com evidências do seu emprego na antiga civilização egípcia, romana e grega, cujo componente mais marcante usado no concreto foi a pozolana. Através das eras, essas sociedades deixaram vestígios do uso pioneiro do concreto em suas construções, marcando o início de uma trajetória evolutiva que culminaria no material de construção vital e versátil que conhecemos hoje.

Com o progresso contínuo da tecnologia e o aprimoramento dos métodos de construção, surgiu a necessidade premente de desenvolver um material que fosse notavelmente mais resistente e eficiente. Para atender a essa demanda, foi concebida a ideia de combinar as propriedades únicas do concreto e do aço, resultando na criação de um compósito notável: o concreto armado (BASTOS, 2023). Essa inovação representou um salto significativo na engenharia civil, produzindo um material que é substancialmente mais robusto e versátil do que suas contrapartes individuais. Ao integrar a solidez do aço à resiliência do concreto, o concreto armado se estabeleceu como uma resposta eficaz às complexas demandas da construção moderna.

É notável a relevância do concreto na sociedade atual, isso se deve, em grande parte, às suas inúmeras vantagens. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o concreto não apenas é o material de construção mais usado, mas também ocupa a segunda posição na lista dos recursos mais consumidos pela humanidade, ficando apenas atrás da água. Isso se deve principalmente a uma série de características, tais como baixo custo, facilidade de transporte, versatilidade de moldagem e durabilidade (SANTOS, 2008). No entanto, ao longo do tempo, fatores ambientais e de serviço podem desencadear processos de degradação que comprometem a integridade estrutural dessas edificações. Um dos fenômenos mais prevalentes e preocupantes nesse contexto é a carbonatação do concreto.

Para Pauletti (2007), a carbonatação é um processo em que o pH dos materiais à base de cimento é reduzido devido à reação físico-química que ocorre entre os compostos hidratados do cimento e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) presente da atmosfera. Embora essa reação pareça inofensiva à primeira vista, ela desencadeia uma série de mudanças microestruturais no concreto, resultando em uma redução na alcalinidade do ambiente ao redor das armaduras metálicas. Essa diminuição da alcalinidade torna o concreto menos eficaz na proteção das armaduras contra a corrosão, colocando em risco a segurança e a durabilidade das estruturas.

Apesar de todos os desenvolvimentos voltados a solucionar patologias e catalogar as possibilidades de resolução, a engenharia civil busca avançar nos estudos e tornar mais prático e barato para quando os sintomas de perda de qualidade surgirem, ser mais seguro e simples de serem realizados as correções. Desse modo, investindo nos estudos aprofundados no âmago das patologias, antes que sejam necessárias correções mais profundas o que, conseqüentemente, encarecem os respectivos métodos corretivos.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

- Levantar informações acerca da carbonatação e mostrar estudo de caso de dois edifícios com características distintas. Por fim, serão avaliadas suas causas e possíveis medidas corretivas e preventivas.

### 2.2 Objetivos específicos

- Discutir as causas e consequências da carbonatação.
- Comparação dos ensaios realizados nos dois edifícios.
- Indicar métodos corretivos.

### 2.3 Justificativa

Através das avaliações e laudos que constata as patologias, será possível a elaboração de medidas corretivas que retirem a possibilidade de danificações mais profundas na estrutura de concreto armado, dessa forma, afetando sua composição e função estrutural.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Concreto armado

O concreto é um material construtivo com ampla disseminação, sendo encontrado em casas, obras de saneamento, rodovias, pontes e em até plataformas de extração de petróleo. Estima-se que são utilizados por ano cerca de 11 bilhões de toneladas de concreto, sendo um consumo de 1,9 tonelada de concreto por habitante ao ano, apenas inferior ao consumo de água no mundo (PEDROSO, 2009).

De acordo com a NBR 6118:2003, elementos de concreto armado são definidos como “Aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência”, dessa forma, entende-se a preocupação e atenção que é necessária no emprego da armadura no concreto armado, sendo responsável por administrar principalmente as cargas que causam flexão na estrutura.

Assim sendo estabelecido que, a quantidade de água no concreto e sua relação de quantidade de ligamento que irá determinar as características de densidade, compacidade, porosidade, capilaridade e fissuração, além de sua resistência mecânica, sendo o principal indicador da qualidade do concreto empregado (SOUZA; RIPPER, 1998).

Anteriormente, era entendido como concreto uma estrutura que tinha vida útil infinita, não sendo necessário reparos já que sua durabilidade em relação a outros elementos era muito maior, porém, com o uso frequente se identificou as degradações presentes com até pouco tempo de uso. Mesmo os concretos sendo antigos apresentarem maior resistência, o concreto hoje é dosado para ser utilizado a menor proporção possível de cimento e manter os padrões de durabilidade (MARTINS, 2011).

As edificações precisam atender a critérios mínimos de habitabilidade, por exemplo, que são expressas através de normas técnicas como a NBR 15575 (ABNT, 2013) que irá descrever as condições que deverão ser atendidas de acordo com os materiais e componentes da edificação (ZUCHETTI, 2015).

Após os tempos modernos foi entendido que o concreto é, na verdade, instável ao longo do seu tempo, já que suas características físicas e químicas são alteradas de acordo com o seus componentes e a resposta que recebe do meio ambiente em que está inserido. Essas alterações poderão comprometer o desempenho da estrutura, ou material, sendo definido como deterioração. Já os elementos agressores, são identificados como agentes

de deterioração (SOUZA; RIPPER, 1998).

Através do incorporador que serão passadas as informações necessárias que irão poder ou não trazer riscos a edificação, por exemplo, como a presença de aterro sanitário, presença de agentes agressivos no solo ou outros que possam se manifestar ao decorrer das fases de execução (ZUCHETTI, 2015).

Para alcançar o nível de qualidade desejado para o produto em questão, é crucial que ele esteja alinhado com os requisitos de satisfação do cliente, ao mesmo tempo em que mantém um preço aceitável. A garantia desse padrão de qualidade vem por meio de um conjunto de ações programadas e sistemáticas, cujo propósito é assegurar a confiança de que o produto atenderá às expectativas estabelecidas para ele (SOUZA; RIPPER, 1998).

### 3.2 Patologias e suas características

O termo patologia se alinha juntamente com a definição que é encontrada na medicina, se relacionando com o estudo de sintomas, origens e natureza das doenças que são identificadas. Sendo definido como todas as manifestações que ocorrem no ciclo de uma edificação que possam prejudicar o desempenho de uma obra, ainda é dito que a maioria das patologias surgem no projeto e na execução das estruturas, como também a má qualidade dos materiais empregados podem causar interferências, além de fatores que não são controláveis mas devem ser levados em conta, como a variação térmica e umidade (SANTOS, 2021).

As manifestações patológicas apresentam características diferentes uma das outras, podendo surgir de várias formas, portanto é possível listar quais são os processos que favorecem os surgimento dessas manifestações e as suas possíveis causas, a partir dessa compreensão, torna-se possível desenvolver soluções que visam prevenir o reaparecimento dessas manifestações no futuro (SANTOS, 2021).

A quantificação da incidência de problemas patológicos em determinadas regiões é um trabalho que exige análises mais profundas da estrutura e uma quantidade de informações que possibilitem determinar que tipo de patologia está mais suscetível. O Brasil possui maior número de manifestações patológicas ligadas a fissuração e corrosão de peças estruturais de concreto armado, correspondendo a 20% do total de manifestações conhecidas (ZUCHETTI, 2015).

De acordo com a NBR 15575 (2013), as edificações devem conter um tempo mínimo de vida útil de 50 anos, porém alguma dessas estruturas não atingem essa idade.

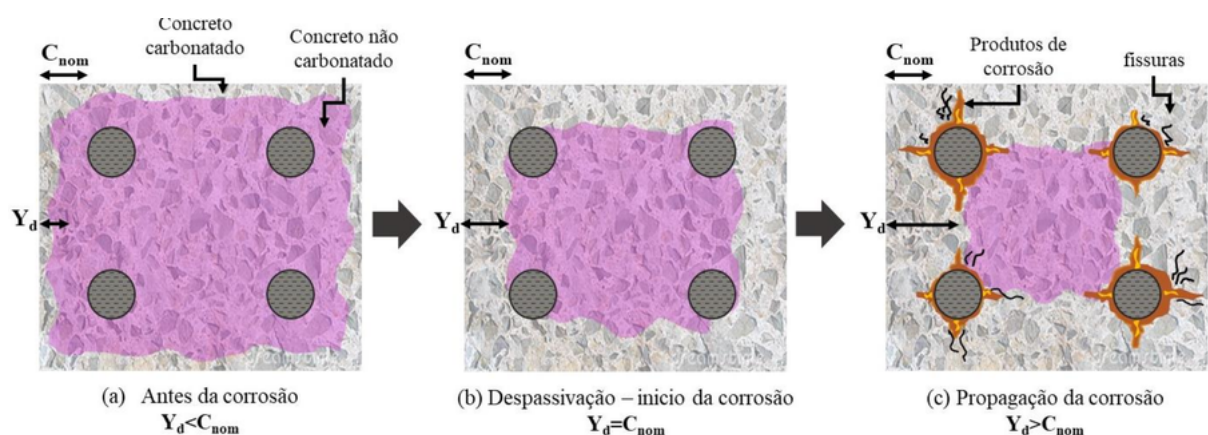
A fase de projeto é uma das fases mais importantes na produção, dessa forma, os erros que são acometidos na fase de projeto são as principais causas de problemas patológicos (SANTOS, 2021).

Algumas patologias são recorrentes a partir da falta de controle tecnológico, falta de cura, falta de espaçadores que iriam garantir o cobrimento correto das armaduras ou também o mal posicionamento das armaduras. Já nas estruturas das edificações são comumente encontradas as fissuras, infiltrações, a corrosão de armaduras e também a movimentação térmica. Sem o tratamento adequado tendem a evoluir de forma gradativa que irão evoluir para outros problemas que serão mais difíceis de serem tratados (SANTOS, 2021).

O cobrimento inadequado irá favorecer os processos de deterioração tal como a corrosão das armaduras que afetam gravemente a resistência da estrutura, através dessa ineficiência se tornará um ambiente mais propício aos agentes externos que serão agressivos à estrutura (SOUZA; RIPPER, 1998).

A corrosão de armaduras gerada pela carbonatação é comumente visto em regiões urbanas, tendo maior incidência em regiões litorâneas. O processo de deterioração é dividido em duas etapas, sendo a primeira a iniciação e a segunda como propagação, onde no período de transição é marcado pela desp passivação da armadura (Figura 1) ao decorrer do processo (FELIX; CARRAZEDO, 2020).

**Figura 1 – Simplificação do avanço da corrosão em uma estrutura de concreto armado que apresenta carbonatação**



Fonte: (HELENE, 1986) apud FELIX, CARRAZEDO (2020)

Apesar de erros em fases primárias, como mão de obra não especializada, falta de condições de trabalho adequadas, erros na interpretação de projetos, argamassas, revestimentos e elementos inadequados poderão desencadear outros erros que propiciarão

o surgimento de problemas patológicos para a estrutura em fases futuras (ZUCHETTI, 2015).

Os custos pela manutenção corretiva na construção civil são elevados pela falta de cultura de manutenções preventivas, ficando apenas focado nos custos na execução e não realizando a preservação correta das estruturas. Dessa forma, criando um custo de progressão geométrica para as correções não visualizadas antes, de acordo com a Lei de Sitter (VITÓRIO, 2006).

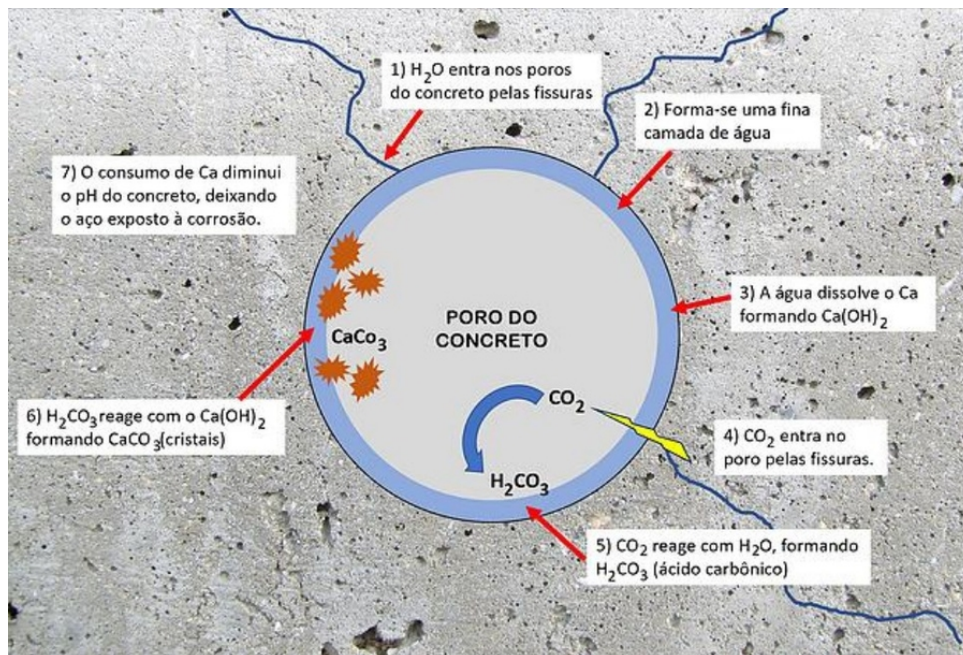
### 3.3 Carbonatação e a degradação do concreto

O ingresso de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no concreto é um dos principais agentes para desencadear a corrosão das armaduras, além do aumento no mundo da emissão do dióxido de carbono que irá tornar mais suscetível o surgimento da patologia no concreto armado principalmente as construídas em ambientes urbanos já que contém uma elevada concentração deste gás (PAULETTI *et al.*, 2009).

A reação da carbonatação se torna realizável através dos produtos hidratados do próprio cimento, como o hidróxido de cálcio, juntamente com o  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera. A relação entre água e aglomerante, as condições de cura, a concentração de  $\text{CO}_2$  em que a estrutura está inserida naquele ambiente e também a temperatura irão influenciar na relação taxa/velocidade em que a carbonatação irá agir (PAULETTI *et al.*, 2009).

Através do esquema (Figura 2), pode-se entender como ocorre o processo de carbonatação dentro da estrutura de concreto armado, se o concreto apresentar o dobro de cobertura conforme solicitado, irá resultar em um aumento em torno de 400% da vida útil da estrutura (RODRIGUES; SOUZA JÚNIOR, 2019).

Figura 2 – Processo que é formado a carbonatação na estrutura de concreto armado



Fonte: RODRIGUES E JÚNIOR (2019)

O mecanismo de carbonatação pode ser simplificado da seguinte forma: primeiro ocorre a difusão do  $\text{CO}_2$  na fase gasosa nos poros e subsequente a dissolução da água nos poros, seguido pela dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na água dos poros e posteriormente se seguirá a dissolução do mesmo nas áreas que ocorrerem maior alcalinidade, após esses processos ocorre a reação entre o  $\text{CO}_2$  que havia sido dissolvido com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que também já foi dissolvido, isso acarretará compostos não hidratados na pasta do cimento, que como resposta terá a redução do volume dos poros e condensação do vapor de água (PAULETTI *et al.*, 2009).

O alto teor de cinza volante no concreto irá resultar em uma maior suscetibilidade à carbonatação, portanto, a vida útil da estrutura em torno do aço das armaduras poderão diminuir em um intervalo de tempo maior. A redução do pH se dá na substituição do cimento da cinza volante, favorecendo a possibilidade do surgimento da corrosão. Para melhoria no desempenho do concreto que foi empregado, propende adicionar a cal hidratada, essa adição é capaz de aumentar o teor residual (SOUZA FILHO *et al.*, 2022).

Outro meio que torna o concreto armado mais suscetível à carbonatação é o consumo da portlandita por função pozolânica, que irá diminuir a alcalinidade da água nos poros, visto que o concreto caracteristicamente é um material poroso quando se encontra no estado sólido. Um dos fatores que governa na taxa de carbonatação será o teor de umidade presente nos poros, sendo obrigatório pra existência dos mecanismos de carbonatação a presença de água e anídrico carbônico nos poros (SOUZA FILHO *et al.*, 2022).

Através do estudo entre carbonatação e a capacidade de compressão, se identificou que quanto maior é a capacidade de compressão da estrutura, menor a porosidade que ela terá, e conseqüentemente, menor a capacidade de profundidade da carbonatação. Dessa forma fica entendido que o efeito contrário a essa estabelecida, ou seja, menor capacidade de compressão/ maior porosidade irá sujeitar a estrutura a receber uma maior capacidade de carbonatação (SILVA, 2007).

Para a identificação da existência de carbonatação pode ser por técnicas visuais e eletroquímicas. A eletroquímica é mais procurada pela alta velocidade e pelo fato de ser não destrutiva, é realizada no próprio local, possibilita uma verificação da estrutura mais extensivo e o processo é mais ágil. Já na técnica visual é retirado um testemunho e esse utilizado um reagente químico, que em geral é fenolftaleína uma solução de 50 g de álcool e 50 g de água. Para a identificação da zona carbonatada para não carbonatada é através da coloração, onde a região que apresenta uma coloração roxa não está passando pelo processo carbonatação, já as áreas que se observa tom incolor, ou seja, não apresentaram diferença na coloração, está passando pelo processo mencionado (KALSING, 2020).

A carbonatação é a responsável pela destruição da camada passivadora que é formada na superfície do aço em ambientes que são altamente alcalino, essa destruição deixará a armadura mais suscetível a corrosão (SOUZA FILHO *et al.*, 2022).

A corrosão de armaduras existentes no concreto é a principal causa de degradação de armaduras, que irá implicar na perda crescente da seção das barras e formação de produtos expansivos que irá causar a fissura do concreto (MARTINS, 2011).

Após a realização da despassivação da armadura, a corrosão irá acontecer por um processo eletroquímico, que surge através dos elementos que propiciam essa reação acontecer, que é o oxigênio, um eletrólito e uma diferença de potencial que irá acarretar a reação (FIALHO *et al.*, 2019).

Um dos aspectos a serem visíveis nas estruturas que passam pela carbonatação é a redução dos níveis de saturação com o aumento gradual na relação a/c na estrutura. Os concretos que apresentarem os poros mais refinados impedem a transferência de umidade, já que os choques entre as moléculas e os poros serão mais frequentes (MEIRA *et al.*, 2006).

A corrosão é uma interação considerada destrutiva entre o material e o ambiente, que irá se manifestar em forma de manchas que é causada pelos produtos corrosivos gerados, além do destacamento e a geração de fissuras que irão prosseguir nas próximas etapas que também auxiliará na penetração da umidade na estrutura e, conseqüentemente,

irá comprometer a segurança estrutural (SANTOS, 2021).

A carbonatação só irá ocorrer se a intensidade de umidade da estrutura for adequada para o desenvolvimento, sendo assim, em ambientes muito ou pouco úmido não ocorrerá carbonatação. Dessa forma, fica entendido que a melhor taxa de umidade para ocorrer o processo é entre 50% e 75%. Para ambientes em que a umidade relativa é encontrada abaixo de 25%, a carbonatação é considerada insignificante, como também em ambientes em que é identificado umidade relativa superior a 75% (SILVA, 2007).



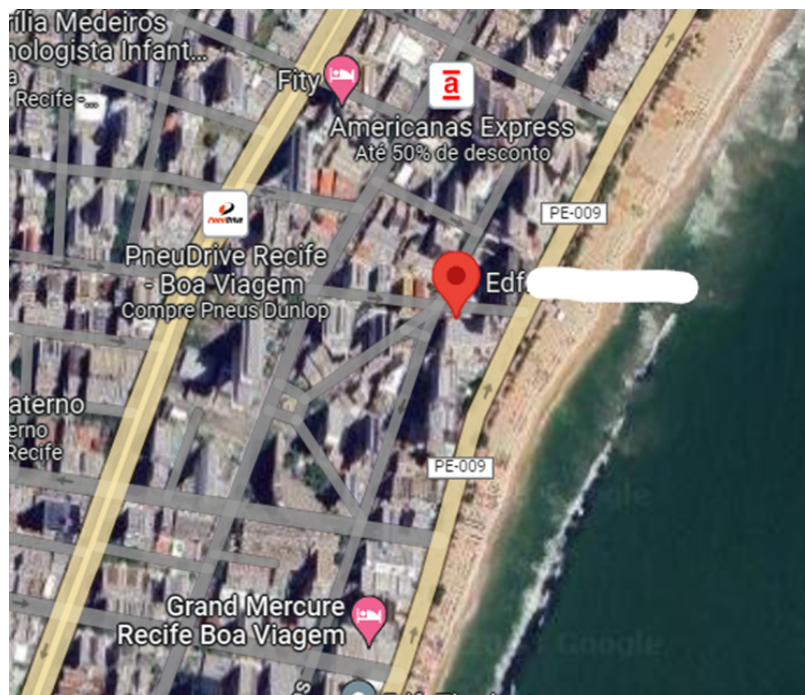
## 4 METODOLOGIA

Este trabalho se caracteriza como estudo de caso para determinação de carbonatação em estruturas de concreto armado, para maior entendimento do assunto tratado, foi realizado um estudo bibliográfico baseado em artigos e revistas científicas referentes ao assunto abordado na pesquisa, a fim de conhecer os principais efeitos da carbonatação e as possíveis causas do seu surgimento.

Por meio da execução de um ensaio de carbonatação, conforme estipulado na norma EN 14630:2006, procedeu-se à aplicação de fenolftaleína nas duas estruturas mencionadas nos relatórios que serão anexados. Esse procedimento visa aferir o impacto da carbonatação nas características da estrutura, com ênfase especial na armadura de concreto armado. A avaliação e elaboração do relatório referente às manifestações patológicas encontradas em ambos os empreendimentos serão minuciosamente descritas. Como se trata de empresas privadas, não serão divulgadas informações referentes aos nomes, no entanto terá uma descrição detalhada do local e das condições nas quais as estruturas em questão estão inseridas.

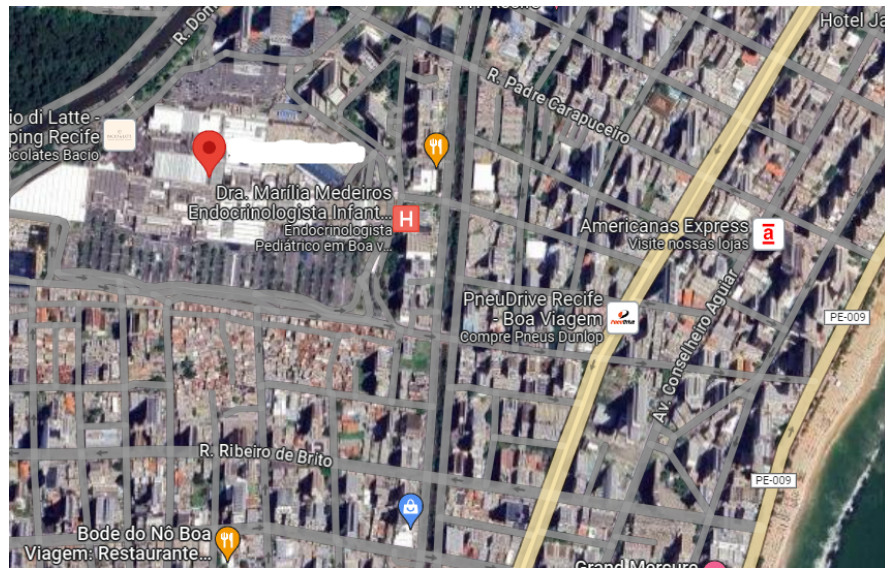
### 4.1 Local do estudo de caso

**Figura 3 – Mapa de localização da área de estudo 1**



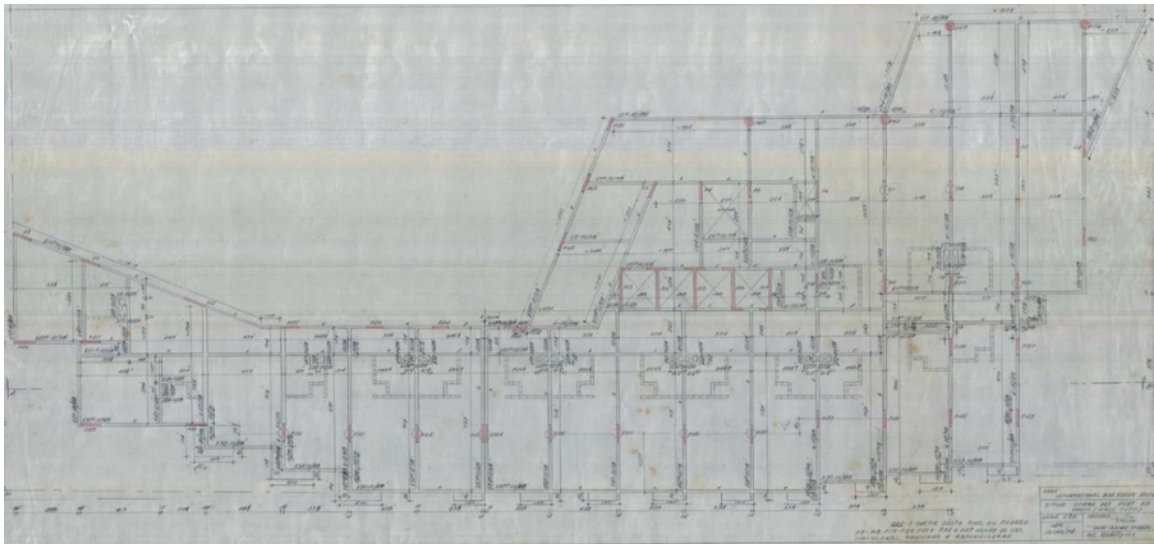
Fonte: Google Maps (2023)

**Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo 2**



Fonte: Google Maps (2023)

**Figura 5 – Planta de locação de pilares para análise de frente de avanço da manifestação patológica**



Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

**Figura 6 – Local abaixo do reservatório de abastecimento que foi realizado a análise de carbonatação**



Fonte: Os autores (2023)

Ambos os empreendimentos estão localizados no bairro de Boa Viagem, em Recife, Pernambuco. Porém, a área de estudo 1 está localizado próximo ao mar (Figura 3) e se trata de um edifício residencial, já área de estudo 2 está localizado mais distante, não sofrendo as influências da maré (Figura 4) e se trata de um local comercial com grande fluxo diário de pessoas.

A primeira área de estudo se trata de um edifício residencial que passou por um retrofit (técnica de revitalização de construções mais antigas, com o objetivo de condicionar as edificações aos tempos de hoje preservando o projeto inicial), apresenta 17 pavimentos e subsolo, possui apartamentos que vão de 28 m<sup>2</sup> a 157 m<sup>2</sup>, sua ocupação foi no período de 1979. O edifício foi executado em concreto “in loco” e possui como elemento de vedação tanto na parte interna como externa a alvenaria de blocos cerâmicos. Através planta onde foi realizado os ensaios de carbonatação (Figura 5) é possível verificar os locais do edifício onde ocorreu a determinação da frente de avanço da manifestação.

Já a segunda área de estudo é um local de comércio com grande fluxo de pessoas e veículos de carga para abastecimento de lojas, a estrutura em questão que foi analisada se trata do reservatório de abastecimento central do estabelecimento, sendo o maior responsável pelo fluxo de distribuição. O local possui bombas de elevação e alto nível de umidade (Figura 6), estando suscetível também a respingos de água e presença de pontos de infiltração de outros locais.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Acerca do estudo sobre a carbonatação nas estruturas de concreto armado, neste capítulo será destrinchado os resultados obtidos através dos laudos técnicos executados nas estruturas para identificação do grau de infiltração da carbonatação nas armaduras de vigas e pilares ensaiadas. Os resultados foram obtidos através da aspersão da solução de fenolftaleína e medição direta com trena simples do grau de infiltração, como também, a identificação de armaduras despassivadas e com processos de corrosão acelerados.

### 5.1 Área de Estudo 1

O ensaio proposto na área de estudo 1 foi realizado em 41 elementos (pilares e vigas), desde o subsolo até o 16° pavimento. Dos 41 elementos analisados, 33 são pilares e 8 são vigas. As Figuras 7 e 8 apresentam o resumo dos dados coletados de cobrimento e frente de carbonatação para pilares e vigas ensaiadas, respectivamente.

**Figura 7 – Resumo de dados de cobrimento e carbonatação em pilares**

		Minimo (mm)	Máximo (mm)	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
PILAR	Cobrimento	4,4	52,1	26,1	11,25
	Carbonatação	1	49,8	14,3	10,25

Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

**Figura 8 – Resumo de dados de cobrimento e carbonatação em vigas**

		Minimo (mm)	Máximo (mm)	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
VIGA	Cobrimento	5	22	13,6	5,2
	Carbonatação	15	50	28,1	12,53

Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

Conforme é observado nas tabelas acima, é possível identificar um grande desvio de cobrimento nas armaduras estudadas. Dessa forma, fica constatado o maior cobrimento de 52,1 mm e o menor de 4,4 mm, ou seja, valores obtidos muito oscilatórios. Essa mesma oscilação ocorre na carbonatação, onde alguns elementos passaram por 50 mm de profundidade de infiltração e indo até valores de 1 mm de infiltração. Estas medidas foram obtidas de forma pontual, apenas sendo realizado nos locais ensaiados, deixando a possibilidade de mais oscilações em outros elementos não analisados.

Na Figura 9 é possível visualizar a presença de pouca manifestação da carbonatação, de acordo com o ensaio, apresentando coloração rosa/roxo na maior parte da estrutura. Porém, já na Figura 10 é nítido a presença da carbonatação, onde maior parte do local ensaiado apresentou a aparência incolor conforme atesta o ensaio. Em complemento, é possível visualizar a deterioração avançada das armaduras, sendo um local mais suscetível ao enfraquecimento de sua resistência de projeto.

**Figura 9 – Área com presença mínima de carbonatação identificada**



Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

**Figura 10 – Trecho ensaio com grande presença de carbonatação na estrutura já apresentando corrosão progressiva das armaduras**



Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

De acordo com a análise laboratorial, os pilares apresentam armaduras com despassivação causada por carbonatação em 33% destes elementos, já as vigas apresentam 100% de despassivação. Os valores obtidos nas vigas se dão bastante pela presença de cobrimento muito inferior aos que são estabelecidos por norma atualmente, deixando desta forma, a camada protetora de concreto nas armaduras mais frágil e exposta.

Na Figura 11 é perceptível, por meio do corpo de prova extraído de uma viga o grau de infiltração da carbonatação na estrutura, esse fator somado ao cobrimento extremamente raso favoreceu para o surgimento da corrosão em 100% das armaduras em vigas.

**Figura 11 – Corpo de prova para identificação do grau de infiltração da carbonatação em vigas do empreendimento**



Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

Mesmo sem o retorno dos analistas acerca do tratamento devido necessário, a empresa responsável pelo empreendimento está realizando recuperações pontuais em estruturas que apresentaram maior deficiência pela manifestação. A restituição está sendo realizada através do emprego de graute, as peças estão passando pelo processo de escarificação até as armaduras, conforme Figura 12.

**Figura 12 – Processo de escarificação realizado para reforço de armaduras atingidas pela carbonatação**



Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

Logo após é realizado o reforço das armaduras com adição de armaduras verticais e horizontais nas áreas que mais foram deterioradas pela corrosão (Figura 13) e iniciado o grauteamento da estrutura com o cobrimento exigido conforme as normas (Figura 14).

**Figura 13 – Reforço de armaduras em áreas atingidas pela corrosão gerada da carbonatação**



Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

**Figura 14 – Realização de fechamento de áreas reforçadas conforme a necessidade vista pela empresa com graute**



Fonte: Laboratório tecnológico privado (2021)

## 5.2 Área de Estudo 2

Na segunda área de estudo, o ensaio de carbonatação proposto usando solução de fenolftaleína foi realizado abaixo da estrutura principal do reservatório de abastecimento do local, onde fica localizado os equipamentos de bombeamento (Figura 15).

Ao lado da estrutura analisada possui também um pequeno reservatório para outros setores, além disto, o local era totalmente fechado sem a presença de luz natural, tornando o ambiente extremamente úmido. As infiltrações em paredes e laje também favoreciam para o surgimento de respingos de água constantes (Figura 16).

Foram identificados aproximadamente 12 pontos de exposição à carbonatação, muitos deles com as armaduras rompidas e outros pontos com as armaduras iniciando o processo de corrosão apresentando coloração escura e deterioração superficial do aço (Figura 17).



**Figura 15 – Aplicação de solução de fenolftaleína no local proposto com mistura de 100 ml de água destilada para 50 ml de álcool etílico e 1 g de fenolftaleína**



Fonte: Os autores (2023)

**Figura 16 – Local com pontos visíveis de deterioração e infiltração que se estendem por todo o local**



Fonte: Os autores (2023)

**Figura 17 – Armaduras apresentando avanço de corrosão e estrutura possuindo frente de avanço em carbonatação**



Fonte: Os autores (2023)

Na estrutura em questão foram observados extensos trechos de áreas totalmente carbonatadas (Figura 18) e pontos de corrosão avançados afetando a função estrutural do elemento em questão, em muitos pontos é perceptível o rompimento completo das armaduras (Figura 19).

**Figura 18 – Áreas com grande carbonatação em trechos totalmente expostos na estrutura de concreto armado**



Fonte: Os autores (2023)

**Figura 19 – Armaduras com alto grau de corrosão sem nenhum tipo de tratamento e frente de deterioração constante**

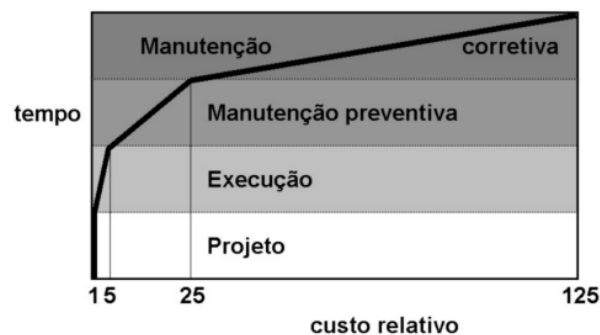


Fonte: Os autores (2023)

Durante a inspeção foi possível visualizar que a estrutura não apresentava nenhum tipo de manutenção e principalmente cobertura inadequada das armaduras. Se supõe que pela idade da construção e falta da normatização dos meios de construção, a estrutura foi construída conforme se imaginava ser necessário de cobertura e especificações estruturais. Além disso, não foram realizadas manutenções preventivas para evitar a deterioração da estrutura em questão.

De acordo com a lei de Sitter (Figura 20), é evidente que os custos das manutenções corretivas são muito superiores em relação aos valores para manutenções preventivas. Além de diminuir os custos operações de manutenção, assegura que a estrutura não passará por estado crítico de sustentação permitindo segurança e controle das estruturas mais antigas.

**Figura 20 – Lei de Sitter que faz relação de custos de manutenção ao decorrer do tempo, onde é notável o aumento na manutenção corretiva**



Fonte: VITÓRIO, 2006 apud SITTER (1984)

Até o momento não foi realizado nenhum reparo do local proposto, as informações

foram repassadas para os responsáveis do empreendimento para ser realizado um estudo mais aprofundado de possíveis formas de realizar as correções necessárias.

## 6 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos foi possível evidenciar que a carbonatação é uma manifestação patológica que abre espaço para a proliferação de outras patologias por tornar a estrutura suscetível e frágil para outras manifestações que comumente são encontradas, como a corrosão e deslocamento do concreto. Se medidas cabíveis não são tomadas, a estrutura passará por um processo de enfraquecimento que a tornará fonte de problemas e custos excessivos.

A ausência da manutenção e cuidado, atrelado com a negligência em relação às construções mais antigas, transforma os elementos em fontes de problemas difíceis de serem solucionados quando não são tratados prontamente. A análise dos empreendimentos revelou como a manutenção corretiva pode se tornar dispendiosa e demorada em elementos que não foram previamente inspecionados.

Além de afetar as condições estruturais padrão, os efeitos visuais são notáveis, já que toda a capacidade de proteção das armaduras é carregada junto com os fatores externos negativos. A primeira área de estudo apresentado já está passando pelo processo de recuperação de pilares e vigas afetados pela carbonatação e estuda soluções futuras para a prevenção do mesmo.

A segunda área de estudo, e talvez o mais prejudicado, ainda não apresentou planos de recuperação, mas por meio deste estudo é viável elaborar planos de correção e meios que visem a diminuição dos fatores exógenos sobre a estrutura analisada. Dessa forma, será possível estender a vida útil dos elementos estruturais que são fundamentais para a distribuição de água no local.

É possível relacionar como diferentes empreendimentos localizados em regiões distintas como estes, um próximo a maré e outro afastado porém em ambiente confinado, podem apresentar resultados semelhantes para a mesma manifestação patológica e denotar as consequências da proliferação de uma patologia. Dessa forma, é possível visualizar soluções comuns para elementos estruturais suscetíveis a diferentes fatores e mesmo assim obter resultados corretivos similares para os mesmos.

## Referências

- FELIX, E. F.; CARRAZEDO, R. **Análise probabilística da vida útil de lajes de concreto armado sujeitas à corrosão por carbonatação via simulação de Monte Carlo**. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/3hdnfVwnc3wTv5NtvdFw59P/?lang=pt#>.
- FIALHO, R. F. *et al.* Um estudo sobre a despassivação da armadura com ênfase na causada por carbonatação do concreto. In: ANAIS, 2019, Mineiros. **IV Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar & Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar**. Mineiros, 2019. p. 1 – 7.
- KALSING, F. S. **CAUSAS E EFEITOS DA CARBONATAÇÃO NA DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO**. 2020. 46 p. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.
- MARTINS, C. A. C. **Estimativa da profundidade de carbonatação do concreto com o uso de redes neurais**. 2011. 90 p. Dissertação (Engenharia Civil) — Universidade Católica de Pernambuco.
- MEIRA, G. R. *et al.* CARBONATAÇÃO NATURAL DE CONCRETOS: RESULTADOS DE CERCA DE QUATRO ANOS DE MONITORAMENTO. **XI Encontro de Tecnologia do Ambiente Contruído - ENTAC**, Florianópolis, v. 1, n. XI, p. 3029 – 3037, Agosto 2006.
- PAULETTI, C. *et al.* Degradação do Concreto Armado por Carbonatação: Execução de Ensaio. **Revista Concreto e Construções**, v. 37, n. 53, p. 35 – 41, Março 2009.
- PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto e Construções**, v. 37, n. 53, p. 14 – 18, Março 2009.
- RODRIGUES, L. A.; SOUZA JÚNIOR, A. C. Carbonatação em estruturas de concreto. In: **REFAF Multidisciplinar**. Alta Floresta: Revista Eletrônica da Faculdade de Alta Floresta, 2019. v. 8, n. 1, p. 90 – 107.
- SANTOS, J. C. dos. **Manifestações Patológicas na Construção: Estudo de caso em residências do município de Crisópolis (BA)**. 2021. 54 p. Monografia (Construção Civil) — Centro Universitário AGES.
- SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. 281 p. Tese (Engenharia de Estruturas) — Universidade de São Paulo.
- SOUZA FILHO, E. B. de *et al.* **Patologias da Construção Civil**. [S.l.], 2022.
- SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. [S.l.]: Pini, 1998.
- VITÓRIO, J. A. P. Vistorias, Conservação e Gestão de Pontes e Viadutos de Concreto. In: ANAIS, 2006. **Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto**. [S.l.], 2006.
- ZUCHETTI, P. A. B. **Patologias da Construção Civil: Investigação Patológica em Edifício Corporativo de Administração Pública do Vale do Taquaris/RS**. 2015. 114 p. Monografia (Engenharia Civil) — Centro Universitário Univates.