



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA PAULA GOMES MESQUITA

ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO: estudo de caso em Açailândia – MA

AÇAILÂNDIA-MA

2024



ANA PAULA GOMES MESQUITA

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS À
CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO: estudo de caso em Açailândia – MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL), campus Açailândia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Ma. Brenda Gomes de Lima Moura

AÇAILÂNDIA-MA

2024

M582a

Mesquita, Ana Paula Gomes

Análise da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado:
estudo de caso em Açailândia-MA / Ana Paula Gomes Mesquita – Açailândia:
UEMASUL, 2024.

57 f. : il.

Monografia (Curso de Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Estadual
da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Açailândia, MA, 2024.

Orientadora: Prof^ª. Ma. Brenda Gomes de Lima Moura

1. Patologia. 2. Concreto armado. 3. Carbonatação. I. Título.

CDU 691(812.1)


ANA PAULA GOMES MESQUITA

**ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO: estudo de caso em Açailândia – MA**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL), campus Açailândia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Ma. Brenda Gomes de Lima Moura


Aprovado em: 26 / 01 / 2024

Documento assinado digitalmente
 **BRENDA GOMES DE LIMA MOURA**
Data: 01/03/2024 06:09:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Ma. Brenda Gomes de Lima Moura
Mestre em Ciência dos Materiais - UFMA
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Documento assinado digitalmente
 **DECKSON LACERDA DE SOUSA COSTA**
Data: 01/03/2024 17:32:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Deckson Lacerda De Sousa Costa
Mestre em Ciência dos Materiais - UFMA
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Documento assinado digitalmente
 **ARTHUR VINICIUS RAMOS TEIXEIRA**
Data: 01/03/2024 16:00:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Esp. Arthur Vinícius Ramos Teixeira
Especialista em Projeto, Dimensionamento e Modelagem de Estruturas e Fundações - IPOG
Faculdade Facimp

Dedico este trabalho acima de tudo a Deus por estar sempre ao meu lado nessa longa caminhada, a minha família que sempre acreditou em mim e nos meus sonhos e as minhas amigas e professores (as) que fizeram parte dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus acima de tudo, pela dádiva da vida, por não ter me deixado desistir dessa longa caminhada que trilhei durante a graduação, por ter me guiado e nunca ter soltado minha mão. Foram dias difíceis, muitas noites sem dormir, ter que dividir o tempo entre o trabalho, faculdade, estudos e atividades pessoais. Muitos me perguntavam como eu dava conta disso tudo e eu só respondia que nem eu sabia como sustentava tudo isso. Não era fácil sair do trabalho pela manhã (depois de ter trabalhado a noite toda) e ir direto pra faculdade ainda com a roupa do trabalho e passar o dia todo assistindo aula. Foram dias de luta e agora me vejo mais próxima aos dias de glória.

Agradeço ao Paulo Rodrigo Da Silva Araújo, meu companheiro, que sempre esteve comigo em todos os momentos, que me ajudou na retirada das amostras para realização desse trabalho, ele que aqui na terra vem sendo a base pra que eu chegasse até onde eu estou, palavras nenhuma expressarão o quão eu sou grata por tudo que ele fez e faz por mim.

Não posso deixar de agradecer as minhas amigas que sempre estiveram ao meu lado nessa etapa da vida, Érica Dos Santos Lima e Williane Pascoal De Lima Cândido, meu trio, ambas tiveram sua importância nessa trajetória, foi com elas que convivi a maior parte do tempo durante esses cinco anos de graduação, foram elas que além de amigas foram minhas professoras, irmãs, conselheiras e quem me ajudava sempre que eu precisava.

Aos meus colegas de turma Briane De Souza Vilarinho e Sandriel Lima Nascimento que sempre me ajudaram como puderam, não mediam esforços para me apoiar e me auxiliar em disciplinas que eu tive dificuldades.

Ao meu amigo Ruan Sousa Coutinho (in memoriam), ele que em vida sempre torceu pelo meu sucesso e tenho certeza que lá do céu está celebrando essa conquista junto comigo.

Ao meu amigo, Wakson De Sousa Almeida que apesar de não ser da mesma instituição me auxiliou e cooperou com seus conhecimentos para me ajudar sempre que eu precisava.

Ainda, agradeço a minha orientadora Brenda Gomes De Lima Moura por ter me ajudado, me instruído, ter dedicado um tempo para me orientar e por ter compartilhado seus conhecimentos, sua orientação foi de extrema importância para realização desse trabalho.

Aos demais professores por compartilhar seus conhecimentos, por ter tornado o aprendizado mais dinâmico e por fazerem tudo isso dar certo, em especial Randal Silva Gomes, Ana Caroline Pereira Nolasco, Ludimilla Da Silveira Ferreira.

RESUMO

Frequentemente as estruturas em concreto armado tem apresentado manifestações patológicas que vão desde fissuras a rachaduras no concreto que podem levar a ruína da edificação, estes fatores podem se dar por diferentes aspectos, sejam eles falham no processo produtivo ou a ausência de material de qualidade e mão de obra qualificada. Além disso, com o crescimento acelerado das cidades faz-se necessário produzir em menos tempo possível, o que muitas vezes faz com que construtores pulem etapas ou não sigam as normas e diretrizes adequadas para uma boa construção, comprometendo assim a saúde da edificação. Outrossim, é grande quantidade de emissão de gás carbono atualmente que se tornou um grande desafio global que corroboram para a danificação dessas estruturas. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi realizar uma análise de profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado localizadas em ambientes de diferentes classes de agressividade ambiental, na cidade de Açailândia-MA. A metodologia empregada é de natureza explicativa e qualitativa. A abordagem explicativa se dar por analisar e reconhecer as causas dos fenômenos estudados, já a qualitativa se dar por meio do estudo de caso. Os resultados das análises de profundidade de carbonatação para as estruturas investigadas indicaram que a média de profundidade de carbonatação variou conforme a localização. Logo, com os resultados obtidos a estrutura situada na área industrial apresentou uma profundidade média de carbonatação de 27,5 mm, enquanto a estrutura na zona rural exibiu 14,2 mm e a da zona urbana registrou 22,5 mm. Foi constatado que o cobrimento de concreto insuficiente está suscetível à corrosão devido à carbonatação. A evidência mais clara desse comprometimento reside no fato de que as armaduras mais superficiais estão a uma profundidade inferior a 15 mm, indicando um potencial impacto negativo na durabilidade e na integridade das estruturas.

Palavras-chaves: Patologia; Concreto armado; Carbonatação.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures often have pathological manifestations ranging from fissures to non-concrete cracks that can lead to the ruin of the building. These factors can occur due to different aspects, whether they are failures in the production process or the absence of quality material and skilled labor. work committed work. Furthermore, with the accelerated growth of cities, it is necessary to produce in the shortest possible time, which often causes builders to skip steps or not follow the standards and guidelines for good construction, thus compromising the health of the building. Furthermore, the amount of carbon gas emission is currently large and has become a major global challenge that contributes to the damage of these structures. In this sense, the objective of this study was to carry out an analysis of carbonation depth in reinforced concrete structures located in environments with different classes of environmental aggressiveness, in the city of Açailândia-MA. The explanatory approach takes place by analyzing and reflecting on the causes of the reflections studied, while the qualitative approach takes place through the case study. The results of carbonation depth analyzes for the investigated structures indicated that the average carbonation depth varied according to location. Therefore, like the results obtained, the structure. in the industrial area it presented an average carbonation depth of 27.5 mm, while the structure in the rural area exhibited 14.2 mm and that in the urban area recorded 22.5 mm. Where it was found that the reinforcement close to the surface is susceptible to corrosion due to carbonation. The clearest evidence of this compromise lies in the fact that the most superficial reinforcements have a depth of less than 15 mm, providing a potential negative impact on the durability and integrity of the structures.

Keywords: Pathology; Reinforced concrete; Carbonation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma das degradações do concreto armado	15
Figura 2-Reação álcali-agregados.	16
Figura 3-Lixiviação	16
Figura 4-Expansão por ataques de sulfatos.....	17
Figura 5-Reações deletérias	17
Figura 6- Carbonatação.....	17
Figura 7-Ataques por íons cloreto.....	17
Figura 8-Tipos de corrosão em armaduras	18
Figura 9-Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH no tempo.....	19
Figura 10-Avanço do processo de carbonatação.....	20
Figura 11-Corpo de prova com aspersão de fenolftaleína	22
Figura 12-Influência da umidade relativa no grau de carbonatação, considerando que a umidade do concreto está em equilíbrio com a umidade ambiental.....	26
Figura 13-Estrutura localizada na área industrial de Açailândia-MA.....	30
Figura 14-Estrutura localizada na zona rural de Açailândia-MA	31
Figura 15-Estrutura localizada na zona urbana de Açailândia-MA.....	31
Figura 16-Etapas para realização da retirada de amostras.....	34
Figura 17-Furos realizados para coleta das amostras na estrutura localizada na zona rural	35
Figura 18-Perfuração e coleta de amostra	36
Figura 19-Amostras coletadas.....	37
Figura 20-Planta baixa da estrutura na Área Industrial	38
Figura 21-Planta baixa da estrutura na zona rural.....	39
Figura 22-Planta baixa da estrutura na zona rural.....	40
Figura 23-Profundidade que cada amostra representa.....	40
Figura 24-ZUF1 profundidade 17,5mm	41
Figura 25-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação, sendo o valor específico neste caso de 17,5 mm	42
Figura 26-ZUF2 profundidade 22,5mm	42
Figura 27-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação	42
Figura 28-ZUF3 profundidade 27,5mm	43

Figura 29-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação	43
Figura 30-ZRF1 profundidade 12,5mm	44
Figura 31-ZRF2 profundidade 12,5mm	44
Figura 32-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação	45
Figura 33-ZRF3 profundidade 17,5mm	45
Figura 34-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação	45
Figura 35-ZIF2 profundidade 27,5mm.....	46
Figura 36-ZIF2 profundidade 27,5mm.....	46
Figura 37-ZIF3 profundidade 27,5mm.....	47
Figura 38-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Avanço do processo de carbonatação	24
Quadro 2-Classificação da agressividade do ambiente em função da concentração de gás carbônico	25
Quadro 3-Classificação da agressividade do ambiente	29
Quadro 4-Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para (margem de segurança do cobrimento do concreto) $\Delta c = 10$ mm.....	30
Quadro 5-Materiais utilizados.....	33
Quadro 6-Profundidade de carbonatação de cada estrutura	49
Quadro 7-Classificação das estruturas de acordo com o ambiente que se encontram	49
Quadro 8-Média de profundidade x Idade cronológica das estruturas analisadas	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Degradação do concreto armado	16
2.2 Processo de carbonatação do concreto armado	19
2.2.1 Ensaio de carbonatação com fenolftaleína	22
2.3 Fatores de interferência na profundidade e velocidade de carbonatação	23
2.3.1 Concentração de CO₂	24
2.3.2 Teor de umidade relativa	25
2.3.3 Temperatura	27
2.3.4 Cura	28
2.3.5 Cobrimento	28
3. METODOLOGIA	31
3.1 Estudo de caso	31
3.2 Materiais e métodos	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 Análise das amostras da estrutura da zona urbana	44
4.2 Análise das amostras da estrutura da zona rural	46
4.3 Análise das amostras da estrutura da área industrial	49
4.4 Análise dos dados	50
5. CONSIDERAÇÃO FINAL	54
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

Define-se patologia como sendo os defeitos apresentados em uma edificação que afetam sua conservação, onde a edificação deixa de cumprir suas funções de desempenho, comprometendo sua vida útil (Ferreira *et al.* 2018). O termo patologia é de origem grega, onde *pathos* significa doença e *logos* significa estudo. Com isso, entende-se que patologia é o "estudo das doenças".

Sales *et al.* (2021) afirma que, o concreto armado, na construção, é o sistema estrutural mais usado, suplantando os demais materiais (bloco cerâmico ou tijolo, aço e madeira). O fator predominante que levou o setor construtivo a essa preferência, resulta da maior durabilidade dos componentes deste material, visto que, o aço é protegido do ambiente externo e paralelo a isso, de uma agressividade acentuada.

Em relação ao concreto, a patologia está associada ao estudo da deterioração das estruturas constituintes deste material, mesmo o concreto armado sendo uma combinação de materiais de forma inteligente, versátil e durável. Ridolphi *et al.* (2022) destaca que dentre as manifestações patológicas presentes na indústria da construção, a deterioração do concreto armado se destaca como uma das principais ocorrências identificadas em edifícios.

A norma ABNT NBR 6118:2014 - *Projeto de estruturas de concreto – procedimento*, cita os variados mecanismos de degradação do concreto, como as fissuras, a corrosão das armaduras, ataques de cloretos, os ataques de sulfatos, a carbonatação do concreto, lixiviação, etc. Essas manifestações patológicas podem comprometer a durabilidade das estruturas, influenciando na redução da longevidade destas. Assim, a garantia da durabilidade de edifícios de concreto armado requer o atendimento a um conjunto de requisitos em todas as fases, desde o projeto e a execução, até a manutenção

A durabilidade de uma estrutura está diretamente ligada a parâmetros básicos, com as características da construção, a agressividade ambiental e critérios da vida útil necessária para estruturas. Assim, de acordo com Zucareli *et al.* (2021) a longevidade de uma construção está vinculada não somente a execução do projeto, à composição do concreto, à realização e à manutenção, tanto corretiva quanto preventiva, mas também às condições ambientais a qual será submetida.

Com isso, a NBR 6118:2014, considera que as estruturas de concreto armado devem ser elaboradas e construídas de forma que atendam as condições ambientais previstas e, quando utilizadas de acordo com o que foi estabelecido em projeto, possam conservar sua estabilidade,

segurança e aptidão em serviço no decorrer do período que corresponde a sua vida útil.

Logo, um dos principais fatores que prejudicam a longevidade das estruturas de concreto armado é a corrosão, pois envolve a degradação progressiva do aço, resultante de processos químicos, levando à diminuição da área efetiva da seção transversal e, por conseguinte, à redução da capacidade de suportar cargas. Sales et al. (2021) enfatiza que em estruturas de concreto, os principais agentes responsáveis pela corrosão incluem o dióxido de carbono (CO_2) e os cloretos (Cl^-).

Visto isso, a NBR 6118:2014 estabelece orientações relacionadas à durabilidade do concreto, incluindo critérios de qualidade e espessura do revestimento, os quais variam de acordo com o ambiente em que são aplicados. No entanto, devido a deficiências no planejamento e na implementação, muitos não seguem rigorosamente as diretrizes estipuladas pela norma, resultando em manifestações patológicas, como a corrosão causada pela carbonatação.

Assim, o dióxido de carbono que geralmente é originado da queima de combustíveis, quando penetra no concreto de revestimento, forma a frente de carbonatação, a qual, em boas condições de umidade e oxigênio, diminuem a alcalinidade da pasta de cimento, reduzindo o pH do concreto até alcançar a armadura, despassivando-a (SILVA *et al.* 2023).

Para tanto, o desenvolvimento da frente de carbonatação está diretamente associado à predisposição com que o dióxido de carbono encontra para se propagar pelo revestimento de concreto no decorrer do tempo, dando origem a corrosão por carbonatação e conseqüentemente acarretando a perda de vida útil da estrutura. Logo, se a corrosão por carbonatação atingir a armadura, provocará o aparecimento de manchas, deslocamento do concreto, fissuras, perda da seção resistente e ainda da aderência (COSTA, 2020).

Assim, em estruturas de concreto armado, o revestimento de concreto desempenha um papel essencial na preservação da armadura, oferecendo tanto proteção física contra agentes agressivos, oxigênio e umidade, quanto proteção química ao manter um ambiente alcalino que previne a desativação da armadura (COUTO, 2017).

Diante do exposto, essa pesquisa tem como objetivo analisar a profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado, localizadas em ambientes com diferentes classes de agressividade e comparar com as especificações feita pela ABNT NBR 6118:2014, acerca da durabilidade do concreto.

1.1 Justificativa

O aumento da emissão de gás carbono nos dias de hoje é um desafio global de extrema relevância. A queima de combustíveis fósseis em veículos, usinas de energia e processos industriais é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono, resultando no aumento das concentrações desse gás na atmosfera (COUTO,2017).

Além disso, a irresponsabilidade de muitos construtores que optam por não seguir normas ou diretrizes de projetos é um problema sério e preocupante. Isso não apenas compromete a qualidade das construções, mas também coloca em risco a segurança dos usuários, com o surgimento de manifestações patológicas. A patologia em edificações, como definida por Ferreira et al. (2018), representa uma preocupação crítica no setor da construção, uma vez que compromete a integridade e a vida útil das estruturas, afetando sua funcionalidade e segurança.

No contexto atual da construção civil, o concreto armado é amplamente utilizado, conforme destacado por Sales et al. (2021), devido à sua durabilidade e versatilidade. No entanto, a corrosão por carbonatação, um dos principais agentes patológicos, é frequentemente negligenciada, resultando em consequências graves para as estruturas, como perda de seção resistente e aderência, fissuras e deslocamento do concreto, conforme mencionado por Costa (2020). Portanto, a pesquisa visa preencher uma lacuna crítica na literatura, fornecendo uma análise abrangente da correlação entre a agressividade ambiental, as especificações normativas e a presença da carbonatação em estruturas, além de que as pessoas serão capazes de compreender melhor como o ambiente influencia as construções na cidade de Açailândia, bem como a relevância de aderir às orientações das normas de projetos.

Além disso, a investigação contribuirá para a conscientização de práticas construtivas mais duráveis, ao destacar a importância do revestimento de concreto na proteção da armadura, conforme enfatizado por Couto (2017). Ao entender como a corrosão por carbonatação se desenvolve em diferentes contextos, a pesquisa poderá orientar o setor da construção, na implementação de estratégias de prevenção e manutenção adequadas, visando à preservação da vida útil das estruturas de concreto armado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado localizadas em ambientes de diferentes classes de agressividade ambiental, na cidade de Açailândia-MA.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar a retirada de amostra do concreto em forma de pó de cada uma das estruturas localizadas em diferentes classes de agressividade ambiental;
- Verificar a profundidade média de carbonatação em cada estrutura;
- Fazer o ensaio de carbonatação utilizando a solução de fenolftaleína;
- Analisar o resultado do ensaio de carbonatação conforme as especificações que a NBR 6118:2014 faz acerca da durabilidade do concreto.

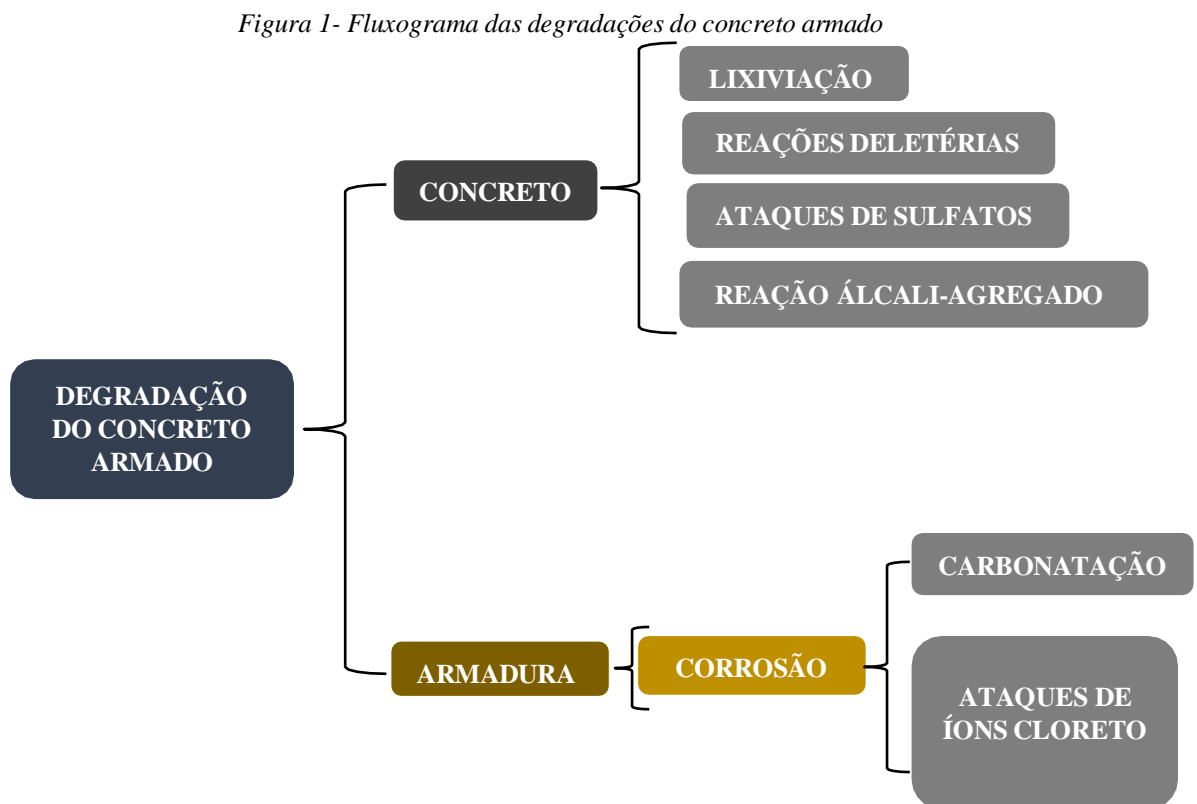
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Degradação do concreto armado

A mistura de cimento, pedra britada, areia, água e possivelmente adições minerais e/ou aditivos químicos, resulta no concreto, o qual está entre os materiais de maior consumo globalmente. De acordo com o descrito por Sales et al. (2021), em estruturas de concreto armado, o concreto, é responsável por envolver a armadura de aço, a fim de protegê-la, tanto fisicamente quanto quimicamente, tendo em vista que se houver a má execução deste, poderá comprometer a sua funcionalidade.

O concreto sendo um material com uma estrutura interna permeável, contém vazios que podem ser ocupados por água ou ar. Esses poros estabelecem uma conexão com o ambiente circundante e desempenham um papel crucial no transporte de gases, água e substâncias corrosivas dissolvidas para o interior do concreto. Como resultado, os processos de degradação estão intimamente associados a esses poros (SILVA *et al.*, 2021).

A NBR 6118 (2014) aborda diversos mecanismos de deterioração tanto do concreto, como da armadura, como mostra a Figura 1.



Fonte: Autor próprio, 2023

Em relação ao concreto, alguns desses mecanismos incluem expansão por ataques de sulfatos, expansão pela reação álcali-agregado, lixiviação do concreto e reações deletérias. E ainda, há a degradação da armadura que é devido a corrosão, causada por agentes agressivos, como íons cloreto (Figura 7) e pela carbonatação (Figura 6). Isso sugere que a norma considera uma variedade de fatores que podem afetar a integridade e durabilidade do concreto em diferentes situações (CAMPOS,2019).

A norma (NBR 6118,2014) explica os principais processos de degradação associados ao concreto. A lixiviação (Figura 3) ocorre quando o concreto é exposto a águas puras, ácidas ou com teor de dióxido de carbono elevado, resultando na dissolução e transporte dos compostos hidratados da pasta de cimento.

A expansão por ataques de sulfatos (Figura 4) trata-se da expansão devido à ação de águas e solos contendo sulfatos, que leva a reações expansivas e danosas na pasta de cimento hidratado. A expansão pela reação álcali-agregado (Figura 2) trata-se da expansão provocada pelas reações entre os álcalis presentes no cimento e certos tipos de agregados reativos, causando aumento de volume no concreto.

As reações deletérias (Figura 5) superficiais são aquelas que ocorrem em alguns agregados devido a transformações nos minerais ferruginosos presentes em sua composição mineralógica, o que pode resultar em danos na superfície ou na estrutura do concreto.

Figura 2-Reação álcali-agregados



Fonte: Blog da engenharia,2009 (apud Sousa et al., 2021)

Figura 3-Lixiviação



Fonte: Ecivil, 2010 (apud Sousa et al., 2021)

Figura 4-Expansão por ataques de sulfatos



Fonte: Schiavini,2018 (apud MA et al., 2006)

Figura 5-Reações deletérias



Fonte: Hasparyk,2021 (apud Hasparyk et. Al,2016)

Figura 6- Carbonatação



Figura 7-Ataques por íons cloreto



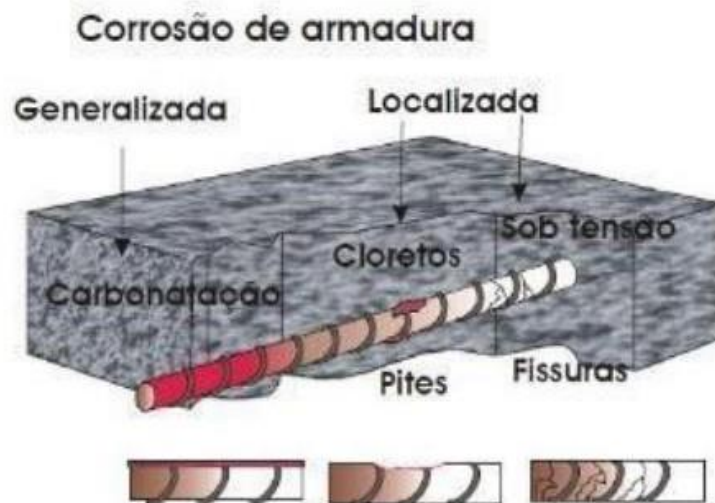
Fonte: Siqueira et al. (2017)

Couto (2017) menciona que durante o processo de endurecimento do concreto, sob condições apropriadas de umidade ambiental, ocorre a formação de uma rede de poros no material. Esses poros são preenchidos por uma solução que contém principalmente íons OH^- , Ca^{++} , Na^+ , K^+ e SO_4^{2-} .

Essa solução resulta em um alto nível de alcalinidade no concreto, com um pH que varia de 12,6 a 13,5. Em ambientes onde há a presença de oxigênio (O_2) e esse pH elevado, uma camada de óxidos é formada na superfície do aço que está presente no concreto. Essa camada de óxidos que é formada é muito aderente, compacta e invisível é conhecida como "camada passivadora" e tem a capacidade de proteger o aço contra o processo de corrosão. Assim, quando essa camada passivadora, é despassivada, tem-se o processo de deterioração da armadura (COUTO, 2017).

A norma (NBR 6118,2014) elucida os principais processos de degradação associados a armadura, que é a despassivação por carbonatação e despassivação por ação de cloretos. O processo de carbonatação, conhecida como corrosão generalizada, ocorre quando o hidróxido de cálcio no concreto reage com dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera. A corrosão por ação de cloreto, conhecida como corrosão localizada, é susceptível de ocorrer em estruturas situadas em ambientes agressivos, como aquelas próximas ao mar ou em áreas industriais. A Figura 8 mostra os tipos de corrosão que ocorrem nas armaduras.

Figura 8-Tipos de corrosão em armaduras

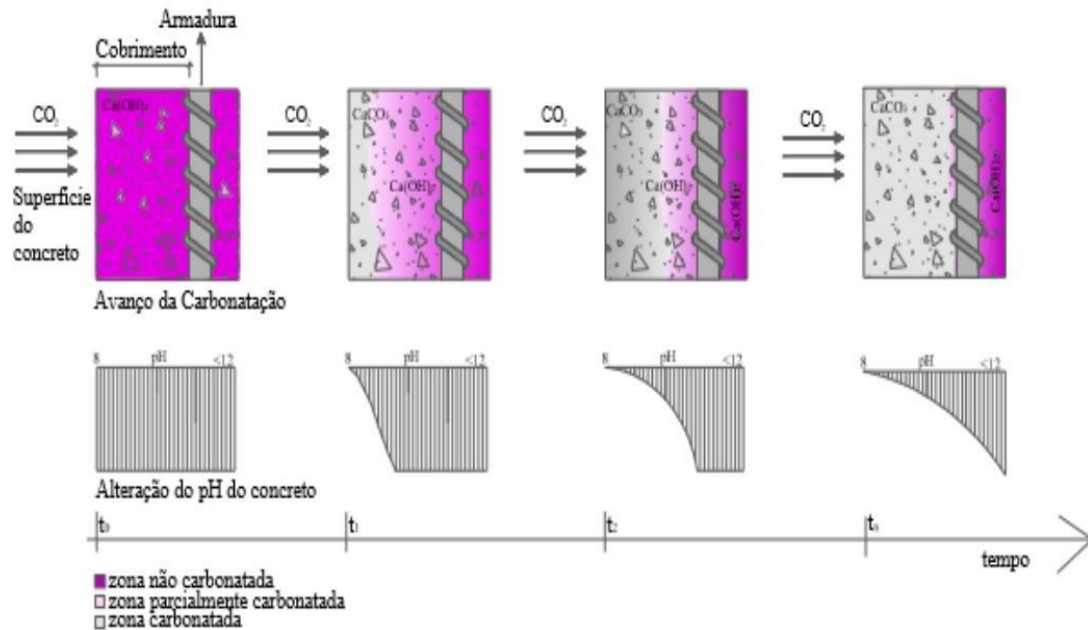


Fonte: Cascudo, 1987 (apud Sousa et al., 2021)

2.2 Processo de carbonatação do concreto armado

A carbonatação é um processo que acontece quando o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera das áreas urbanas penetra no concreto e interage com os íons presentes na solução dentro dos poros desse material. Essa interação resulta na formação de carbonatos, que são substâncias responsáveis por reduzir o pH da solução dentro dos poros, aproximadamente para um valor de 8,5 (Figura 9). Como consequência desse processo, a camada passivadora se torna instável e ocorre a despassivação dessa camada de proteção (COUTO,2017).

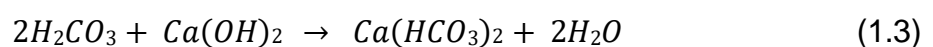
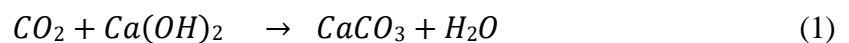
Figura 9-Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH no tempo



Fonte: Possan, 2010 (apud Valença, 2016)

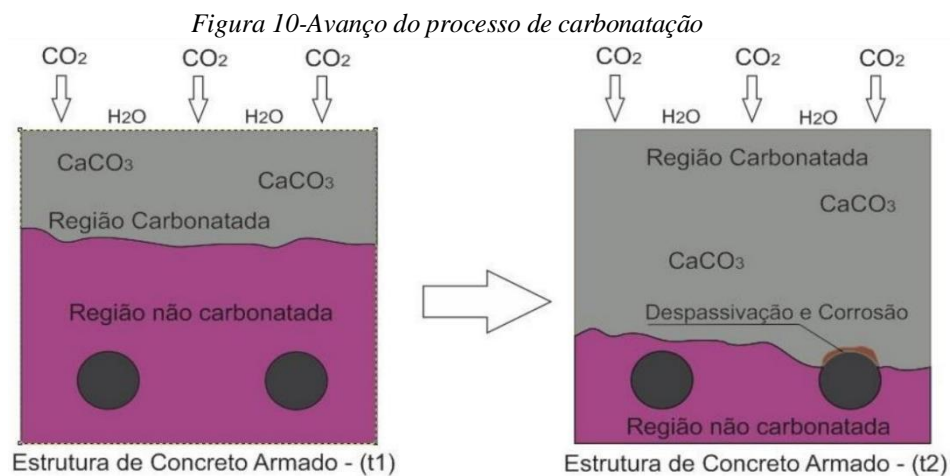
Nascimento *et al.* (2021) explica que o processo de carbonatação começa na superfície do concreto e, gradualmente, avança para o seu interior, criando o que é chamado de "frente de carbonatação". Bastos (2019) menciona que quando a frente de carbonatação atinge a armadura, ela danifica a camada protetora da armadura, o que resulta no início da corrosão desse material. Essa corrosão causa expansão, que por sua vez leva à formação de fissuras, descolamento do concreto que reveste a armadura e, o mais agravante, reduz a área efetiva da armadura.

Raisdorfer, *et al.* (2015) aponta que resumidamente as reações químicas da carbonatação envolvem a conversão de certos minerais presentes na pasta de cimento hidratado em sais carbonatados. No entanto, a reação mais importante da carbonatação é a conversão do $Ca(OH)_2$ (hidróxido de cálcio) em $CaCO_3$ (carbonato de cálcio), como indicado na equação geral (1).



Siqueira, *et al.* (2017) explica que no processo de carbonatação, há uma sequência de 3 reações distintas. Na primeira etapa, conforme indicado na equação (1.2), o dióxido de carbono presente na atmosfera reage com a água que preenche os espaços vazios do concreto, resultando na formação de ácido carbônico (H_2CO_3). Na segunda etapa, representada pela equação (1.3), o ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio, levando à criação de bicarbonato de cálcio e água. A terceira etapa, que é a equação (1.4), é a última etapa da carbonatação, na qual o bicarbonato de cálcio e o hidróxido de cálcio participam de uma reação de troca dupla, culminando na produção de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e água. Estas etapas descrevem o processo sequencial de carbonatação no interior do concreto.

A partir do momento que CO_2 entra em contato com o hidróxido de cálcio formando o carbonato de cálcio nos poros do concreto, o pH deste vai diminuindo gradativamente, deixando de proteger o aço. À medida que a frente de carbonatação vai avançando, o pH vai diminuindo, com isso a frente de carbonatação progride gradualmente para a parte interna do concreto podendo atingir a armadura, gerando a despassivação, como mostra a Figura 10. Assim, é perceptível que a alta alcalinidade do concreto protege a camada passivadora do aço.



Fonte: Tasca, 2012 (apud Valença, 2016).

A concentração de dióxido de carbono (CO_2) influencia diretamente o nível de acidez (pH) no concreto. Quanto maior a presença de CO_2 , menor será o pH e, conseqüentemente, mais espessa será a camada de carbonatação formada no concreto. Logo, estruturas com um pH abaixo de 9 são consideradas carbonatadas, enquanto aquelas com um pH acima de 12 são consideradas não carbonatadas (CYBULSKI *et al.*, 2017).

2.2.1 Ensaio de carbonatação com fenolftaleína

A carbonatação não é visível a olho nu e, portanto, é preciso realizar ensaios para identificar sua presença (Couto, 2017). Logo, a identificação da progressão da frente de carbonatação e a detecção de processos de corrosão do aço devido à carbonatação podem ser realizadas por meio de duas abordagens principais: técnicas visuais e técnicas eletroquímicas (Kausing, 2020).

As técnicas eletroquímicas são preferíveis devido à sua rapidez e, especialmente, porque não causam danos às estruturas, permitindo que sejam aplicadas no próprio local. Isso agiliza o processo de avaliação e proporciona uma análise completa das condições das estruturas. Em contraste, entre as técnicas visuais, destaca-se a utilização de reagentes químicos em amostras retiradas das estruturas para verificar a presença da carbonatação (Kausing, 2020).

Campos (2019) destaca que para medir a extensão da carbonatação no concreto, costumam ser usados métodos colorimétricos. Isso significa que a medição é feita através da aplicação de substâncias indicadoras de pH, como fenolftaleína ou a timolftaleína. Quando esses indicadores entram em contato com uma solução ácida, a estrutura assume uma coloração característica que varia dependendo do tipo de indicador de pH usado no processo.

Assim, a carbonatação é um processo que causa uma mudança no pH do concreto, reduzindo-o de um valor de 13 para aproximadamente 9. Devido a essa alteração, a fenolftaleína é empregada como indicador para destacar a região onde a carbonatação ocorreu no concreto (Raisdorfer *et al.* 2015).

Com isso, Balestra *et al.* (2019) afirma que a coloração violeta sugere que o concreto possui um pH superior a 9, o que o torna protetor contra a corrosão das armaduras. Por outro lado, se não houver nenhuma coloração (ou seja, incolor), isso indica que o pH do concreto está abaixo de 9, o que aponta para a ocorrência da carbonatação no material como mostrado na Figura 11.

Figura 11-Corpo de prova com aspersão de fenolftaleína



Fonte: Kausing, 2020.

Raisdorfer *et al.* (2015) menciona que a solução utilizada para o ensaio de carbonatação é composta de 1g de fenolftaleína, 49g de álcool e 50g de água. Essa solução é aspergida sobre a amostra, permitindo a distinção visual entre as zonas carbonatadas e não carbonatadas do concreto no interior das estruturas. Embora essa técnica ofereça a vantagem de observar o concreto internamente e avaliar com precisão do crescimento da frente de carbonatação, ela é considerada destrutiva, e os resultados obtidos são qualitativos (KALSING, 2020).

2.3 Fatores de interferência na profundidade e velocidade de carbonatação

A extensão e a velocidade da carbonatação são determinadas por fatores ambientais e pelas propriedades finais do concreto após a sua cura, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1-Avanço do processo de carbonatação

Fatores Condicionantes		Características Influenciadas
Condições de Exposição	Concentração de CO ₂	Mecanismo físico-químico
		Velocidade de Carbonatação
	Umidade Relativa do Ar	Grau de saturação dos Poros
		Velocidade de Carbonatação
	Temperatura	Velocidade de Carbonatação
Características do Concreto	Composição química do cimento:	
	- Característica do clínquer	Porosidade da pasta carbonatada
	- Teor de adições	Reserva alcalina
	Traço	Porosidade
	Qualidade de execução	
- Defeitos	Porosidade	
- Cuidados com a cura	Grau de hidratação	

Fonte: Kazmierczak, 1995 (Apud Rodrigues et al., 2019)

2.3.1 Concentração de CO₂

Oliveira (2019) descreve que a quantidade de dióxido de carbono presente na atmosfera que envolve o concreto está intimamente relacionada com a taxa de carbonatação, uma vez que desempenha um papel crucial juntamente com o hidróxido de cálcio na ocorrência desse processo. Além disso, essa relação é diretamente proporcional, já que um aumento na concentração de CO₂ resulta em uma aceleração na velocidade de carbonatação.

De acordo com Costa (2020) elevadas concentrações de dióxido de carbono aceleram a probabilidade de corrosão do concreto. Em estruturas de concreto com uma proporção água/cimento mais elevada, a infiltração ocorre de maneira mais veloz, aumentando, assim, o risco de degradação, especialmente em ambientes com níveis elevados de CO₂. Essa situação é mais acentuada em locais especiais, como túneis, viadutos e garagens, devido a seu confinamento, o que resulta em concentrações de dióxido de carbono acima do normal. Geralmente, em ambientes fechados, a taxa de carbonatação é maior do que em ambientes abertos, onde há renovação constante do ar.

Embora não seja a única variável que influencia a profundidade da carbonatação, uma vez que deve estar em conjunto com outros elementos que promovem a difusão do dióxido de carbono, a presença de CO₂ no ambiente desempenha um papel essencial na análise da carbonatação em estruturas de concreto (Valença, 2016).

Com isso, a NBR 6118:2014 apresenta uma classificação dos ambientes e estabelece uma relação entre a classe de agressividade do ambiente e sua concentração gás carbônico, levando em consideração as variações que podem ocorrer de um ambiente para outro Quadro 2.

Quadro 2- Classificação da agressividade do ambiente em função da concentração de gás carbônico

Classificação da agressividade do ambiente sobre as armaduras			
Classe da agressividade	Macro-clima	Micro-Clima	Gás carbônico no ambiente
I	atmosfera rural	UR ≤ 60%	≤ 0,3%
II	urbana	UR de 60% a 95%	≤ 0,3%
III	marinha ou industrial	UR de 60% a 98%	≥ 0,3%
IV	pólos industriais	Interiores úmidos de indústrias	> 0,3%

Fonte: NBR 6118:2014.

A quantidade de dióxido de carbono (CO_2) presente no ambiente varia consideravelmente dependendo do tipo de local onde uma estrutura de concreto armado está localizada. Em ambientes rurais, a concentração média de CO_2 na atmosfera é de 0,03%. Em contraste, em áreas urbanas, essa concentração é maior, atingindo 0,30%, e em áreas urbanas com influência industrial, pode chegar a 1,0%. Com base nesses dados, observa-se uma diferença significativa, de até 10 vezes, entre ambientes urbanos e rurais no que diz respeito à presença de CO_2 na atmosfera. Além disso, essa diferença pode ser ainda maior, chegando a até 33 vezes, ao comparar a agressividade do CO_2 em áreas urbanas-industriais com ambientes rurais (Réus *et al.* 2016).

Araújo (2018) destaca que em áreas específicas de certas estruturas, a carbonatação pode ser mais pronunciada em comparação com o restante da estrutura. Isso pode ocorrer, por exemplo, em regiões subterrâneas de garagens de edifícios que possuem elementos de concreto expostos. A razão para isso é que esses ambientes geralmente têm uma ventilação limitada e, portanto, uma concentração relativamente maior de dióxido de carbono (CO_2) devido aos gases dos escapamentos de veículos.

2.3.2 Teor de umidade relativa

De acordo com Silva *et al.* (2020) a umidade relativa refere-se à proporção entre a quantidade de vapor de água presente no ar e a máxima quantidade que o ar poderia conter. O aumento da umidade tem um impacto significativo na intensificação dos efeitos corrosivos da atmosfera.

Costa (2020) explica que a carbonatação não ocorre quando os poros estão completamente desprovidos de umidade ou totalmente encharcados, porque, nessas condições,

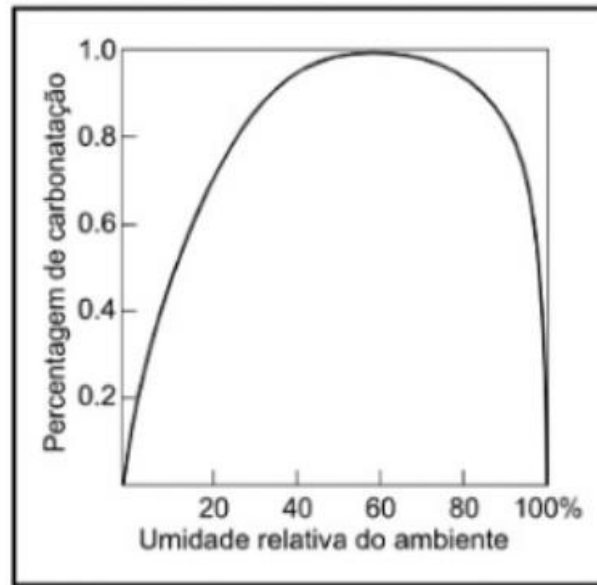
o dióxido de carbono não consegue efetuar reações, nem penetrar. Quando os poros do concreto estão completamente desprovidos de umidade, geralmente devido à baixa umidade do ambiente, o CO_2 pode facilmente adentrar nas camadas internas do concreto, mas a falta de água impede a carbonatação, uma vez que não há água disponível para interagir com os elementos do concreto.

Da mesma forma, em situações em que os poros estão completamente saturados, a carbonatação também é evitada devido à dificuldade de penetração do CO_2 por conta do alto teor de água, resultando em uma taxa de difusão lenta. Portanto, para que a carbonatação ocorra, os poros devem estar moderadamente preenchidos com água, permitindo que o CO_2 se desloque facilmente e reaja com os componentes do concreto, desencadeando assim o processo de carbonatação (COSTA, 2020).

Lubamvu (2023) menciona que é possível afirmar que nos poros saturados de água, a ocorrência da carbonatação é bastante limitada devido à reduzida taxa de difusão do CO_2 , ao passo que nos poros excessivamente secos, o gás permeia facilmente, mas a escassez de umidade impede a realização da reação. Consequentemente, em ambientes sujeitos a variações climáticas frequentes, como chuva intensa e exposição ao sol, a carbonatação da superfície do concreto se desenrola de forma gradual ou quase imperceptível. Por outro lado, em locais abrigados onde os níveis de umidade se mantêm dentro da faixa de 50% a 80%, a taxa de progresso da carbonatação é substancialmente elevada, contribuindo para a deterioração mais rápida do concreto.

A umidade relativa do ambiente desempenha intervenções acerca da quantidade de água que está nos poros do concreto, com isso, esta mantém a velocidade de propagação do CO_2 nos espaços intersticiais através dos poros do concreto, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12-Influência da umidade relativa no grau de carbonatação, considerando que a umidade do concreto está em equilíbrio com a umidade ambiental.



Fonte: Ribeiro, 2018 (Apud Oliveira,2019)

Através da Figura 12, pode-se observar que os elevados graus de carbonatação surgem no momento em que a umidade relativa se encontra entre 50% à 65%. Em contrapartida, quando possui umidades abaixo de 20% ou acima de 95% a carbonatação acontece de forma lenta ou apenas não ocorre.

2.3.3 Temperatura

Silva *et al.* (2020) afirma que as variações de temperatura podem acelerar a corrosão em condições de temperatura mais altas; oscilações térmicas podem afetar a capacidade de dissolução de substâncias corrosivas, exemplificado pelos carbonatos; o aumento da temperatura diminui a solubilidade de gases aumentando a velocidade de carbonatação.

Assim, Pauletti (2004) aponta que as temperaturas comuns (variam entre 20 e 40 °C) têm um impacto limitado nas reações de carbonatação. No entanto, a temperatura desempenha um papel significativo no processo de corrosão das armaduras, sendo um fator de grande importância que não deve ser negligenciado.

2.3.4 Cura

Oliveira (2019) ressalta que a cura do concreto consiste na implementação de medidas para impedir que a água presente no concreto evapore rapidamente. Durante a cura, o concreto é mantido sob uma camada de água por um período específico, permitindo que ocorram as reações de hidratação e endurecimento do cimento. Quando a cura não é realizada corretamente, podem surgir fissuras de diferentes tamanhos no concreto. Essas pequenas aberturas facilitam a entrada do dióxido de carbono (CO_2), tornando mais fácil a progressão da frente de carbonatação no concreto.

Oliveira (2019) destaca que a qualidade da cura do concreto está diretamente relacionada ao tempo e ao método empregado. Quanto maior for o período de cura e quanto mais eficiente for o método utilizado, maior será o grau de hidratação do cimento, resultando em uma menor porosidade e permeabilidade no concreto. Isso, por sua vez, levará a uma taxa de carbonatação reduzida. Portanto, a qualidade da cura é um fator de extrema importância para controlar a carbonatação no concreto.

Considerando que um processo adequado de cura do concreto reduz o número de vazios, conexões entre poros e evita fissuras de retração, é possível concluir que a realização de uma cura eficaz é essencial para minimizar os efeitos da carbonatação (ARAÚJO,2018).

2.3.5 Cobrimento

Couto (2017), destaca que o concreto de cobertura desempenha um papel fundamental na segurança e durabilidade das estruturas de concreto armado, fornecendo duas formas de proteção: proteção contra agressões externas e proteção química.

Na proteção contra agressões externas, o concreto de cobertura age como uma barreira de defesa física, protegendo a armadura da estrutura contra agentes agressivos, como oxigênio e umidade. Esses elementos podem corroer a armadura com o tempo, enfraquecendo a estrutura. Assim, o concreto de cobertura evita o contato direto da armadura com esses agentes prejudiciais.

Na proteção química, além da proteção física, o concreto de cobertura também oferece proteção química. Ele mantém um ambiente alcalino ao redor da armadura, o que é essencial para prevenir a despassivação da armadura. A despassivação ocorre quando o ambiente próximo à armadura se torna ácido, o que pode resultar na corrosão da armadura. Portanto, ao manter um

meio alcalino, o concreto de cobertura contribui para a preservação da armadura e, por consequência, para a integridade da estrutura.

Com base no que está descrito na norma NBR 6118:2014, é necessário que estruturas de concreto armado sejam projetadas mediante as condições ambientais, ainda na etapa de projeto, de forma a proporcionar segurança, estabilidade e aptidão de serviço no decorrer da sua vida útil. Ainda, esta norma apresenta o conceito de agressividade onde este está relacionado as ações físicas e químicas que agem nas estruturas de concreto armado, além disso, classifica as regiões em classes de agressividade conforme o ambiente ao qual essa está exposta, de acordo com o exibido no Quadro 3.

Quadro 3-Classificação da agressividade do ambiente

Classificação da agressividade do ambiente			
Classe da agressividade	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	fraca	Rural	insignificante
		Submersa	
II	média	Urbana 1), 2)	pequeno
III	forte	Marinha 1)	grande
		Industrial 1), 2)	
IV	muito forte	Industrial 1), 3)	elevado
		Respingos Maré	

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

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

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

Fonte: NBR 6118:2014

Diante disto, a norma apresenta o revestimento mínimo que é essencial para as estruturas de concreto armado para cada classe de agressividade ambiental, no qual estão expostos na Quadro 4.

Quadro 4-Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e cobertura nominal para (margem de segurança do cobrimento do concreto) $\Delta c = 10 \text{ mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55

¹⁾ Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

²⁾ Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal $\geq 15 \text{ mm}$.

³⁾ Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal $\geq 45 \text{ mm}$.

Fonte: NBR 6118:2014

3. METODOLOGIA

3.1 Estudo de caso

O presente trabalho trata-se uma pesquisa de caráter explicativo e qualitativo. A elaboração deste consistiu em um levantamento bibliográfico sobre o tema, utilizando o site de busca Google Acadêmico e Microsoft Edge. Posteriormente, foi realizado um estudo de caso sobre a temática, sendo executado de acordo com o descrito adiante.

O ensaio foi realizado em três estruturas localizadas no município de Açailândia-MA, as quais estão expostas a condições ambientais distintas. Uma das estruturas analisadas está localizada no bairro do Pequiá (Figura 13), onde trata-se de uma região industrial (ZI), classe de agressividade III, que conforme a NBR 6118:2014 é classificada que possui altos índices de poluição, principalmente a atmosférica, visto que essa é uma região onde há a realização de atividades siderúrgicas e conseqüentemente onde há maior concentração de CO₂ (Pestana, 2013).

Tão logo, a outra trata-se de uma estrutura que está instalada na zona rural (ZR), da cidade, classe de agressividade I, mais precisamente no Assentamento Califórnia(Figura 14), e a última está situada mais próximo ao centro da cidade (Figura 15), na zona urbana (ZU), classe de agressividade II, com o local apresentando fatores ambientais que se difere dos outros dois locais mencionados e, as três localidades correspondem a diferentes classes de agressividade de acordo com o ambiente conforme exposto na norma NBR 6118/2014 e mostrado no Quadro 3.

Figura 13-Estrutura localizada na área industrial de Açailândia-MA



Fonte: Autor próprio, 2023

Figura 14-Estrutura localizada na zona rural de Açailândia-MA



Fonte: Autor próprio,2023

Figura 15-Estrutura localizada na zona urbana de Açailândia-MA



Fonte: Autor próprio,2023

3.2 Materiais e métodos

Para o desenvolvimento desse trabalho, foram utilizados os materiais descritos no Quadro 5 abaixo:

Quadro 5-Materiais utilizados

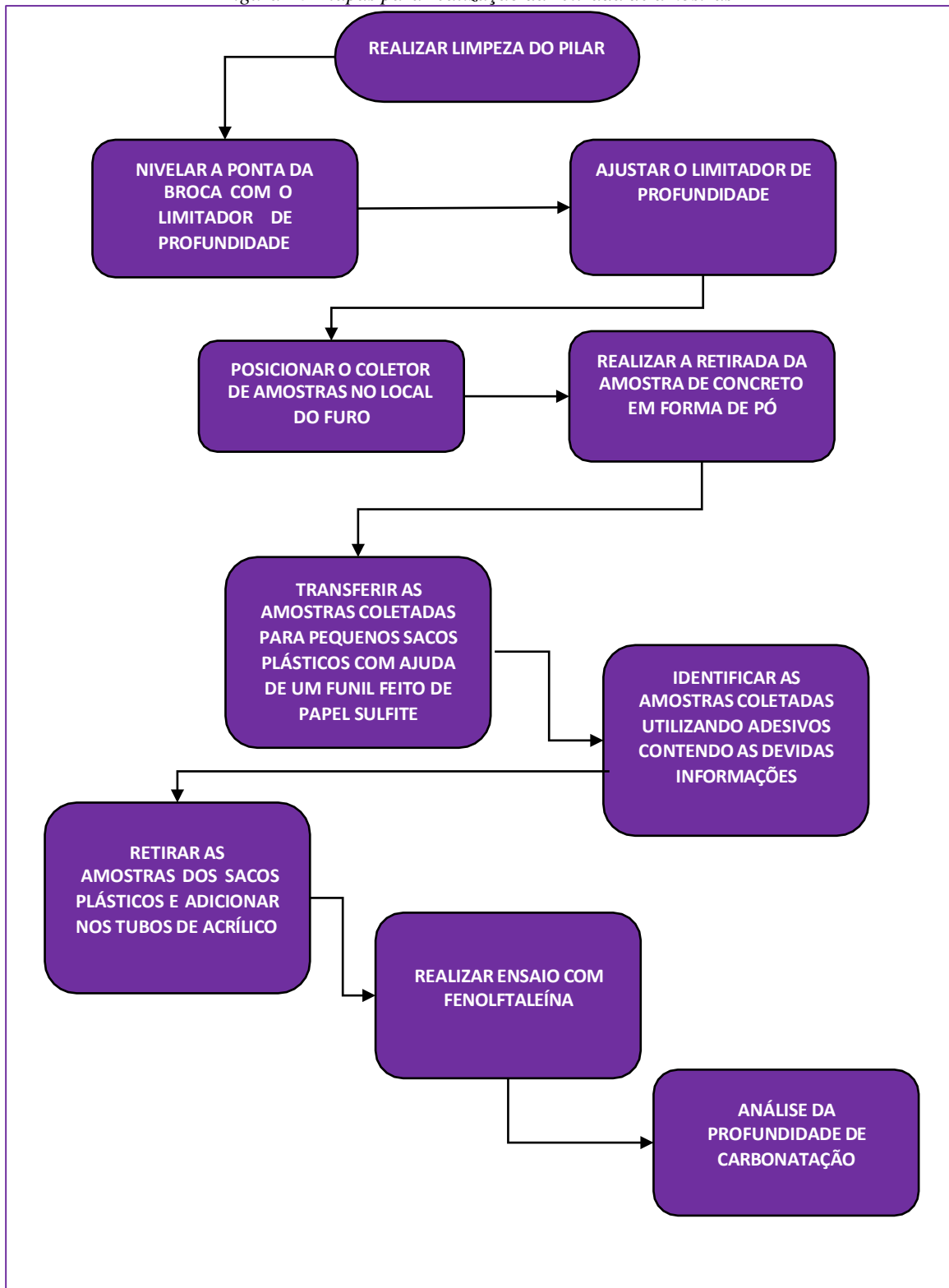
IMAGEM DO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL
	<p>Tubos de acrílico para mistura das amostras.</p>
	<p>Fenolftaleína 1% alcóolica.</p>
	<p>Garrafa plástica de 500 ml adaptada para coleta das amostras.</p>
	<p>Borrifador para aspergir a fenolftaleína sobre o pó de concreto.</p>

	Sacos plásticos para armazenar as amostras.
	Seringa de 5 ml para transferência da fenolftaleína para o borrifador.
	Furadeira e limitador de profundidade para perfuração e coleta de amostras nos pilares.
	Broca com diâmetro de 8mm para perfuração dos pilares.
	Resina epóxi para aplicar nos locais dos furos após a perfuração.

Fonte: Autor próprio, 2023

O fluxograma representado na Figura 16 resume as etapas para realização de retirada de amostras para análise.

Figura 16-Etapas para realização da retirada de amostras



Fonte: Autor próprio, 2023

Para realização deste, foram retiradas amostras em forma de pó, de pelo menos um dos pilares que compõem essas estruturas, visto que esse é um método menos destrutivo e mais viável para realização desse estudo.

Assim, foram realizados três furos com profundidade de 30mm e diâmetro de 8mm, paralelos verticalmente e distantes entre si 200mm (Figura 17, Figura 18 e Figura 19). De cada furo foi retirada 6 amostras, totalizando 18 amostras em cada estrutura e gerando um total de 54 amostras.

Figura 17-Furos realizados para coleta das amostras na estrutura localizada na área industrial



Fonte: Autor próprio, 2023

Figura 18-Furos realizados para coleta das amostras na estrutura localizada na área industrial



Fonte: Autor próprio, 2023

Figura 19-Furos realizados para coleta das amostras na estrutura localizada na zona industrial



Fonte: Autor próprio, 2023

As perfurações para obtenção das amostras foram feitas a cada 5mm e para precisão das profundidades foi utilizado um limitador de profundidade na furadeira, a fim de, garantir a exatidão dessa. Para coletar o pó de concreto foi utilizado um recipiente de garrafa plástica, onde foi feito um furo neste para que pudesse passar a broca e conseqüentemente coletar a amostra (Figura 20).

Figura 20-Perfuração e coleta de amostra



Fonte: Autor próprio, 2023

Após recolher o pó de concreto que ficou na garrafa plástica, com a ajuda de um funil feito de papel sulfite, as amostras foram colocadas dentro de sacos plásticos (Figura 21) e esses foram vedados para, posteriormente, serem colocados em recipientes de acrílico e misturados com a solução de fenolftaleína, a fim de, verificar a profundidade da carbonatação.

As amostras foram retiradas dos sacos plásticos e colocadas em tubos de acrílico, na sequência foi aspergido a fenolftaleína sobre as amostras de concreto em forma de pó. Para análise dos resultados foi feito o desvio padrão de acordo com a Equação apresentada abaixo:

$$D_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

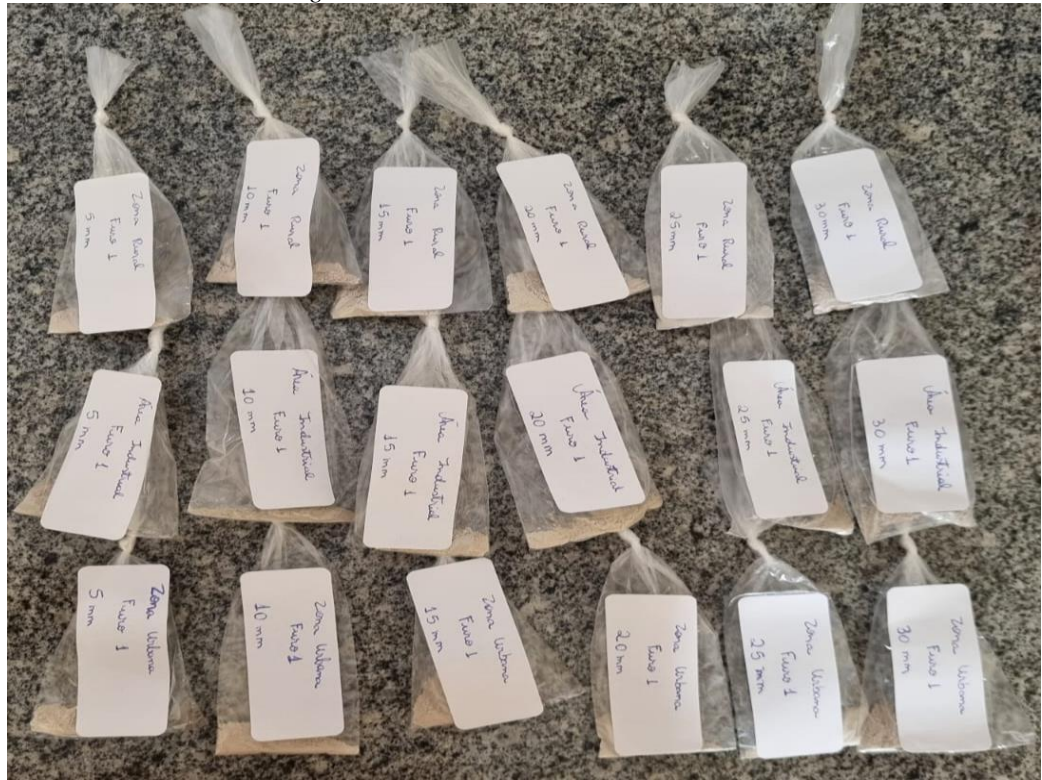
D_p : Desvio padrão

n : quantidade de elementos no conjunto

\bar{x} : média aritmética

x_i : Número do conjunto de dados

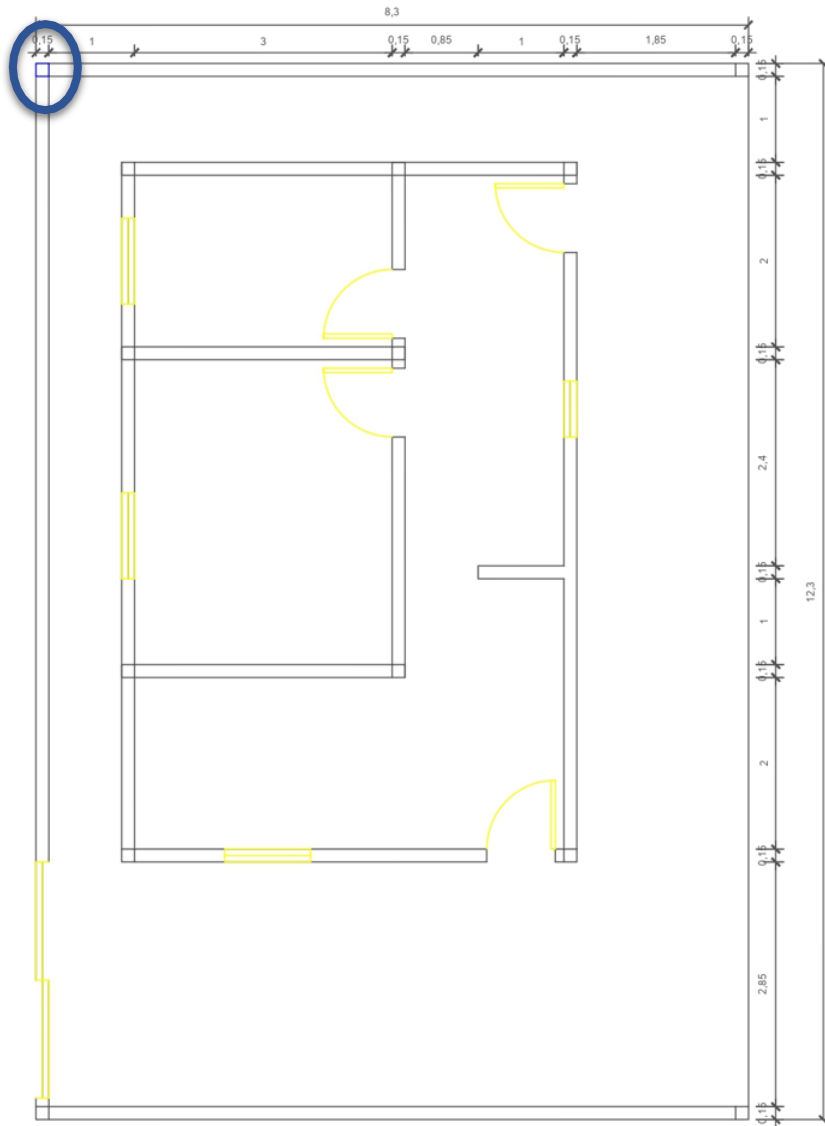
Figura 21-Amostras coletadas



Fonte: Autor próprio, 2023

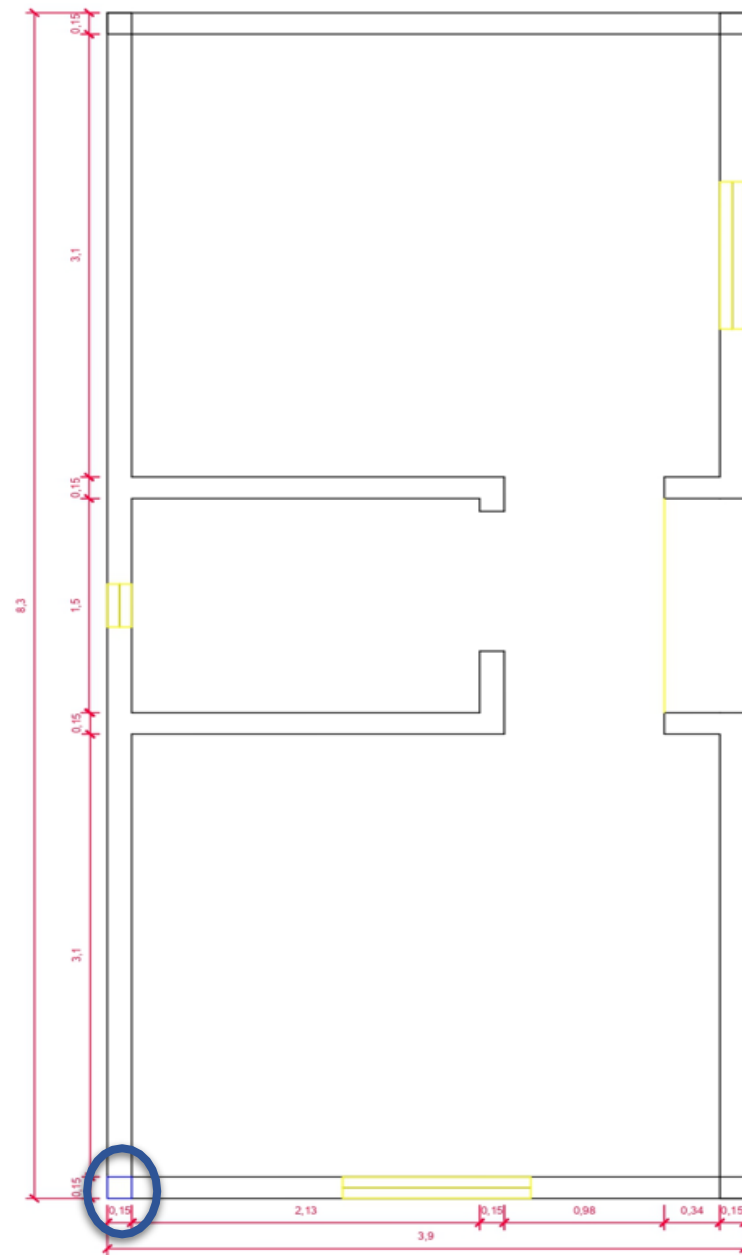
Para melhor visualização dos pilares de onde foram retiradas as amostras em cada estrutura, os mesmos foram representados de acordo com suas respectivas plantas baixas (Figura 22Figura 23Figura 24). Os pilares destacados com círculo na cor azul correspondem aos pilares onde foi feita a retirada das amostras.

Figura 22-Planta baixa da estrutura na Área Industrial



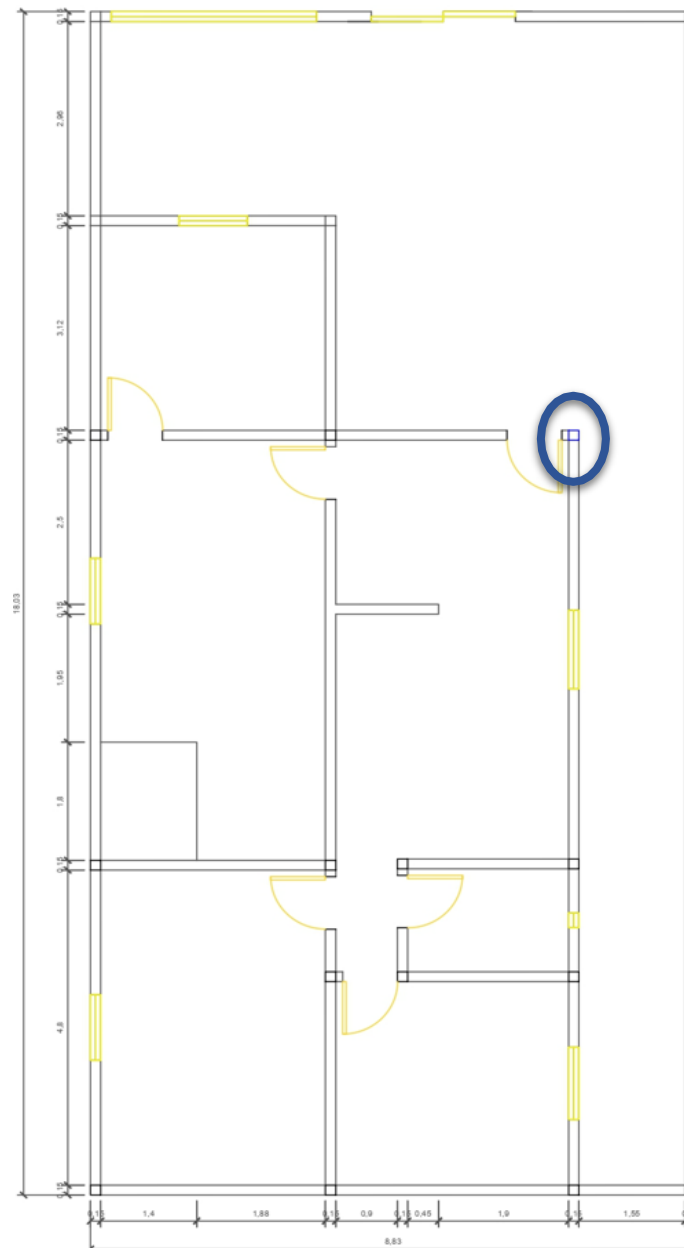
Fonte: Autor próprio, 2023

Figura 23-Planta baixa da estrutura na zona rural



Fonte: Autor próprio, 2023

Figura 24-Planta baixa da estrutura na zona rural



Fonte: Autor próprio, 2023

Para a determinação da profundidade de carbonatação foi estipulado que a profundidade de cada amostra corresponde à média da profundidade inicial e final de cada furo (Figura 25).

Figura 25-Profundidade que cada amostra representa

0	5	10	15	20	25	30 mm
Amostra 1 (2,5mm)	Amostra 2 (7,5mm)	Amostra 3 (12,5mm)	Amostra 4 (17,5mm)	Amostra 5 (22,5mm)	Amostra 6 (27,5mm)	

Fonte: Autor próprio adaptado de (MOREIRA, 2016)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para facilitar e melhorar a visualização dos resultados analisados, as amostras foram codificadas por letras representando a zona a qual a estrutura pertence e por número que corresponde ao número do furo analisado. Assim, a amostra com código ZUF1, por exemplo, trata-se da estrutura localizada na zona urbana e corresponde ao furo 1.

4.1 Análise das amostras da estrutura da zona urbana

A Figura 26 mostra o resultado do ensaio para o primeiro furo da edificação localizada na zona urbana.

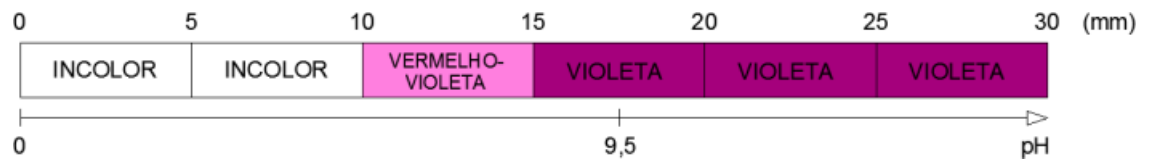
Figura 26-ZUF1 profundidade 17,5mm



Fonte: Autor próprio, 2023

Como mostrado na Figura 26, as amostras do furo 1 se apresentaram incolor até 10 mm, indicando um pH abaixo de 9,0. Com 15 mm a coloração foi vermelho-violeta, o que indica um pH de aproximadamente 8,6. De 20 mm até 30 mm de profundidade, as amostras apresentaram-se na cor violeta, indicando um pH maior que 9,5 como relata Balestra *et al.* (2019). Assim, é possível inferir que a profundidade de carbonatação corresponde a 17,5mm, pois a coloração atinge a cor violeta a partir da amostra de 20mm.

Figura 27-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação, sendo o valor específico neste caso de 17,5 mm.



Fonte: Moreira, 2016

A Figura 28 mostra o resultado do ensaio para o segundo furo da edificação localizada na zona urbana.

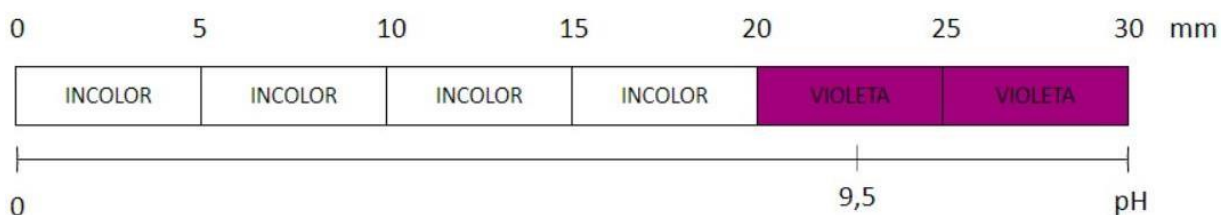
Figura 28-ZUF2 profundidade 22,5mm



Fonte: Autor próprio, 2023

No furo 2 as amostras se apresentaram incolor até 20 mm, indicando um pH abaixo de 9,0. A mudança de coloração ocorreu a partir de 25mm, onde a amostra apresentou-se na cor violeta indicando um pH maior que 9,0. Logo, a profundidade de carbonatação corresponde a 22,5mm.

Figura 29-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação



Fonte: Autor próprio adaptado de (MOREIRA, 2016)

A Figura 30 mostra o resultado do ensaio para o terceiro furo da edificação localizada na zona urbana.

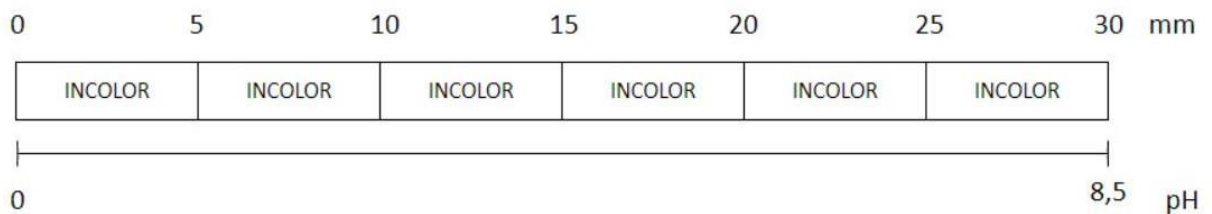
Figura 30-ZUF3 profundidade 27,5mm



Fonte: Autor próprio, 2023

No furo 3, todas as amostras apresentaram-se incolor, indicando um pH abaixo de 9,0, consequentemente apontando que nessa área o concreto da estrutura está sendo carbonatado e que a profundidade de carbonatação corresponde a 30mm.

Figura 31-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação



Fonte: Autor próprio adaptado de (MOREIRA, 2016)

4.2 Análise das amostras da estrutura da zona rural

A Figura 32 mostra o resultado do ensaio para o primeiro furo da edificação localizada na zona rural.

Figura 32-ZRF1 profundidade 12,5mm



Fonte: Autor próprio, 2023

A Figura 33 mostra o resultado do ensaio para o segundo furo da edificação localizada na zona rural.

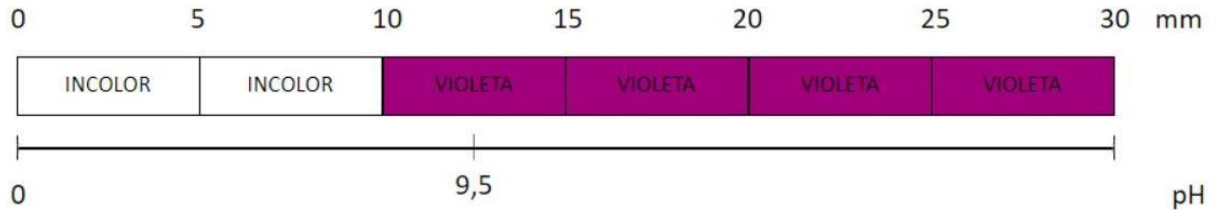
Figura 33-ZRF2 profundidade 12,5mm



Fonte: Autor próprio, 2023

Na Figura 32 e Figura 33, as amostras do furo 1 e 2 se apresentaram incolor até 10 mm, indicando um pH abaixo de 9,0 e consequentemente apontando que o concreto daquela área da estrutura está carbonatado até essa profundidade. A partir de 15mm, as amostras se apresentaram na cor violeta, indicando um pH maior que 9,0. Assim, a profundidade de carbonatação corresponde a 12,5 mm.

Figura 34-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação



Fonte: Autor próprio adaptado de (MOREIRA,2016)

A Figura 35 mostra o resultado do ensaio para o terceiro furo da edificação localizada na zona rural.

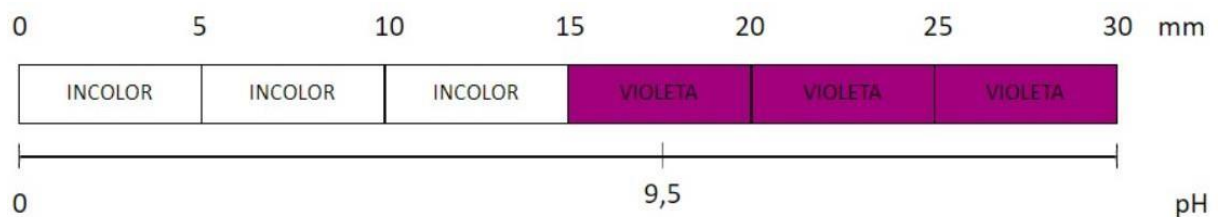
Figura 35-ZRF3 profundidade 17,5mm



Fonte: Autor próprio,2023

Como mostrado na Figura 35 as amostras do furo 3 da estrutura da zona rural permaneceram incolor até 15mm, o que indica um pH abaixo de 9,0. A partir de 20 mm as amostras estão na cor violeta. Assim a profundidade de carbonatação é de 17,55mm.

Figura 36-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação



Fonte: Autor próprio adaptado de (MOREIRA,2016)

4.3 Análise das amostras da estrutura da área industrial

A Figura 37 mostra o resultado do ensaio para o primeiro furo da edificação localizada na área industrial.

Figura 37-ZIF2 profundidade 27,5mm



Fonte: Autor próprio, 2023

A Figura 38 mostra o resultado do ensaio para o segundo furo da edificação localizada na área industrial.

Figura 38-ZIF2 profundidade 27,5mm



Fonte: Autor próprio, 2023

A Figura 39 mostra o resultado do ensaio para o terceiro furo da edificação localizada na área industrial.

Figura 39-ZIF3 profundidade 27,5mm



Fonte: Autor próprio, 2023

As amostras que correspondem aos furos 1,2 e 3 da estrutura localizada na área industrial apresentaram-se incolor desde o furo com profundidade de 5mm, indicando um pH menor que 9,0 e conseqüentemente indicando que o concreto da estrutura está carbonatado.

Figura 40-Utilização de uma escala de cores de graduação para avaliar a profundidade da carbonatação



Fonte: Autor próprio adaptado de (MOREIRA, 2016)

4.4 Análise dos dados

Para os dados obtidos, foi realizado o cálculo do desvio padrão amostral, visto que esse é um indicador que quantifica o nível de dispersão dos dados em um conjunto. Em outras palavras, ele fornece informações sobre a uniformidade dos dados. Quanto mais próximo de zero for o valor do desvio padrão, maior será a homogeneidade dos dados.

Assim, após examinar visualmente as amostras coletadas obteve-se as seguintes profundidades de carbonatação para cada estrutura:

Quadro 6-Profundidade de carbonatação de cada estrutura

ZONA URBANA		ZONA RURAL		ZONA INDUSTRIAL	
Amostra/Furo	Profundidade (mm)	Amostra/Furo	Profundidade (mm)	Amostra/Furo	Profundidade (mm)
ZUF1	17,5	ZRF1	12,5	ZIF1	27,5
ZUF2	22,5	ZRF2	12,5	ZIF2	27,5
ZUF3	27,5	ZRF3	17,5	ZIF3	27,5
MÉDIA	22,5	MÉDIA	14,2	MÉDIA	27,5
DESVIO PADRÃO	5,0	DESVIO PADRÃO	2,9	DESVIO PADRÃO	0,0

Fonte: Autor próprio,2023

Analisando os dados obtidos no Quadro 6, é perceptível que a maior média de profundidade corresponde a estrutura localizada na zona industrial, a menor delas corresponde a estrutura localizada na zona rural e a intermediária trata-se da média de profundidade da estrutura localizada na zona urbana. Diante dos resultados apresentados pode-se observar que isso enfatiza o que está disposto na norma (NBR 6118/2014) em relação as classes de agressividade e para tanto, pode-se classificar os ambientes de acordo com o descrito no Quadro 7.

Quadro 7-Classificação das estruturas de acordo com o ambiente que se encontram

CLASSIFICAÇÃO DO TIPO DE AMBIENTE	CLASSE DE AGRESSIVIDADE	AGRESSIVIDADE	RISCO DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA
RURAL	I	Fraca	Insignificante
URBANA	II	Média	Pequeno
INDUSTRIAL	III	Forte	Grande

Fonte: Autor próprio adaptada de (ABNT NBR6118:2014)

A classificação fica melhor compreendida ao comparar a profundidade de carbonatação de cada estrutura obtida nos ensaios com a idade cronológica da estrutura (informada pelos residentes dos locais) apresentado no Quadro 8.

Quadro 8-Média de profundidade x Idade cronológica das estruturas analisadas

TIPO DE AMBIENTE	MÉDIA DAS PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO	IDADE CRONOLÓGICA (anos)
RURAL	14,2	10
URBANA	22,5	7
INDUSTRIAL	27,5	5

Fonte: Autor próprio,2023

Ao analisar os dados do Quadro 8, é possível inferir que o ambiente que possui a maior média de profundidade (27,5 mm) de carbonatação é o ambiente que possui a menor idade

cronológica, assim como o ambiente que possui a menor média de profundidade (14,2 mm) de carbonatação é o que possui a menor idade cronológica.

Isso pode ser explicado em razão da concentração de dióxido de carbono na atmosfera que entra em contato o concreto, e está estreitamente ligada à taxa de carbonatação, desempenhando um papel fundamental, juntamente com o hidróxido de cálcio, na ocorrência desse processo. Além disso, essa é uma conexão diretamente proporcional, visto que o aumento na quantidade de CO_2 na atmosfera leva a um aumento correspondente na velocidade da carbonatação, como explanado por Oliveira (2019).

Ainda, como visto no Quadro 2 a NBR 6118/2014 retrata que a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) no ambiente varia de acordo com a localização de estruturas de concreto armado (Quadro 2). Em ambientes rurais, a concentração média de CO_2 na atmosfera é baixa, cerca de 0,03%. Em contrapartida, em áreas urbanas, a concentração de CO_2 é significativamente maior, atingindo cerca de 0,30%, e em áreas urbanas com influência industrial, essa concentração pode chegar a 1,0%.

No momento da perfuração das estruturas, foi observado que as edificações analisadas possuíam espessura de cobrimento do concreto menor que 15mm, e esse é outro fator que contribui para esses resultados, uma vez que a norma estabelece os requisitos mínimos de proteção (cobrimento) necessários para as estruturas de concreto armado, considerando a classe de agressividade ambiental a que estão expostas. Em outras palavras, a norma define a quantidade mínima de material de cobertura que deve ser fornecida para garantir a durabilidade e a integridade das estruturas de concreto armado, levando em conta o ambiente em que estão localizadas (Quadro 4) e esses parâmetros não foram respeitados nas estruturas estudadas.

Para estruturas de concreto armado com classe de agressividade I (zona rural), a norma (NBR 6118/2014) recomenda um cobrimento nominal de 25mm. A estrutura em estudo localizada na zona rural alcançou uma profundidade média de carbonatação de 14,5mm e essa possuía um cobrimento menor que 10mm, logo, fica visível que a carbonatação já alcançou a armadura.

Para tanto, a recomendação da espessura do cobrimento nominal para estruturas de concreto armado com classe de agressividade II (zona urbana) corresponde a 30mm e a estrutura em estudo não atendia a esses parâmetros, logo a realização do ensaio mostrou que a profundidade média de carbonatação desta corresponde a 22,5mm, atingindo a armadura.

Em estruturas de concreto armado com classe de agressividade III (área industrial), é recomendado que a espessura do cobrimento seja de 40mm e na estrutura em estudo não foi atendido a esses parâmetros, e, após a realização dos ensaios, foi possível verificar que o

concreto da estrutura presente nesse ambiente possuía uma profundidade média de carbonatação de 27,5mm, chegando a atingir a amadura.

Ainda, a qualidade do concreto nas estruturas em questão é motivo de séria preocupação, evidenciando falhas significativas no processo de construção. Pois foi possível observar claramente a presença de características pulverulentas no concreto, indicando uma falta de uniformidade na mistura e comprometendo a resistência da estrutura. Além do mais, a construção dessas não teve acompanhamento de um profissional da área.

Logo, é crucial ressaltar que a ausência de um adequado controle durante a execução da obra resulta em consequências adversas para a durabilidade e segurança das edificações. Conforme estabelecido pelas normas técnicas vigentes, a presença de concreto pulverulento está em desacordo com os padrões de qualidade exigidos, o que coloca em risco a integridade estrutural.

5. CONSIDERAÇÃO FINAL

A partir das análises de profundidade de carbonatação para as estruturas em estudo foi constatado que a média de profundidade de carbonatação para a estrutura localizada na área industrial foi de 27,5 mm, 14,2 mm para a estrutura localizada na zona rural e 22,5 mm para a estrutura localizada na zona urbana da cidade de Açailândia-MA. Isso revela que o cobrimento de concreto insuficiente está comprometido pela corrosão devido à carbonatação, isso é evidenciado pelo fato de que as armaduras mais superficiais estão a uma profundidade inferior a 15 mm.

A extensiva penetração da carbonatação nas armaduras dos pilares indicou uma urgência na implementação de serviços de recuperação estrutural mais adequados. A execução imediata desses serviços é crucial para evitar custos substancialmente mais elevados que poderiam surgir com a postergação dos reparos.

Em suma, a análise desses dados aponta para a importância de considerar fatores ambientais e os parâmetros mínimos de cobrimento para as estruturas, em conformidade com a NBR 6118:2014 ao avaliar a profundidade de carbonatação em estruturas de concreto. Essa compreensão é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manutenção e proteção eficazes, a fim de garantir a durabilidade e integridade das estruturas ao longo do tempo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Prever a vida útil da estrutura por meio dos modelos de carbonatação, em especial o modelo de Ho e Lewis.
- Verificar a relação dos resultados obtidos com a altura dos furos de cada estrutura.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Myrela. **Avaliação da interferência da carbonatação na resistência do concreto através de ensaios não destrutivos**. Trabalho De Conclusão Do Curso De Engenharia Civil (graduação em engenharia civil) - Universidade Estadual Do Maranhão, São Luís, Ma, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- BALESTRA, Carlos. **Análise da frente de carbonatação em obras de infraestrutura viária: estudo de caso de uma passarela**. revista técnico-científica do CREA-PR, Paraná, 2019.
- BASTOS, Paulo. **Estruturas De Concreto I: Fundamentos Do Concreto Armado**. Universidade Estadual Paulista, Bauru-SP, 2019.
- CAMPOS, Mateus. **Influência da carbonatação no ensaio de esclerometria**. Monografia-Universidade Federal Do Ceará, curso de graduação em engenharia civil, Russas, 2019.
- CASCUDO, Oswaldo. O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. Goiânia: Editora UFG, 1987.
- COSTA, Amanda. **Análise da frente de carbonatação em corpos de prova cilíndricos utilizando concreto convencional expostos ao meio ambiente natural**. 2020. 53 p. Trabalho de conclusão do curso de engenharia civil da mobilidade (graduação em engenharia civil) - Secretaria de educação profissional e tecnológica instituto federal de educação, ciência e tecnologia de Goiás campus Anápolis, Anápolis - GO, 2020.
- COUTO, Rafael. **Avaliação Probabilística da Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Sujeitas à Carbonatação**. Dissertação (Mestrado em engenharia de estruturas) - Universidade Federal De Minas Gerais Escola De Engenharia Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Estruturas, Belo Horizonte, 2017.
- CYBULSKI, Guilherme *et al.* **Reparos Em Estruturas De Concreto Armado Devido A Corrosão De Armadura**. Universidade Do Sul De Santa Catarina (Graduação em engenharia civil) - UNISUL, Palhoça, 2017.
- FERREIRA, Jackeline Batista *et al.* **Manifestações patológicas na construção civil**. Aracaju: Cadernos de graduação, 2018.
- HASPARYK, N.P. **Reação álcali-agregado no concreto** (Capítulo 27). In: ISAIA, G. C. Concreto, Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2021 (no prelo).
- HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.; TORRES, J.R. **Combined Attack From AAR And DEF In The Foundation Blocks Of A Building**. In. 15th ICAAR – International Conference on Alkali-Aggregates Reaction in Concrete, Proceedings of the 15th ICAAR. São Paulo: Ed. Bernardes, H.; Hasparyk, N. P, 2016, Paper n. 106, 11p.
- KALSING, Felipe Schneider. **Causas e efeitos da carbonatação na durabilidade do concreto armado**. Orientador: Adriano de Paula e Silva. 2020. 52 p. Monografia de especialização

(Especialista em Construção Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Geras, Belo Horizonte, 2020.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a Análise da Eficiência de Películas Aplicadas sobre Estruturas de Concreto Armado com o Objetivo de Proteção contra a Carbonatação.** São Paulo, 1995. 168 p. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica Da Universidade de São Paulo.

LUBAMVU, Jonathan. **Estudo De Carbonatação Em Concreto Armado: Causas, Diagnósticos E Proposta De Soluções.** Trabalho De Conclusão Do Curso De Engenharia Civil (Graduação em engenharia civil) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná Departamento Acadêmico De Construção Civil, Santa Maria, RS, 2023.

MA, B.; Gao, X.; Byars, E. A.; Zhou, Q. Thaumaside Formation In A Tunnel Of Bapanxia Dam In Western China. *Cement And Concrete Research*. V. 36, P. 716 - 722, 2006.

MOREIRA, Jairo Dutra. **Verificação De Profundidade De Carbonatação Em Estruturas De Concreto – Estudo De Caso.** Trabalho De Conclusão Do Curso De Engenharia Civil (Graduação Em Engenharia Civil) - Universidade Federal Da Paraíba Centro De Tecnologia Departamento De Engenharia Civil E Ambiental, [S. L.], 2016.

NASCIMENTO, Éberto *et al.* **Patologias Nas Estruturas De Concreto Armado.** *Revista Fatec De Tecnologia E Ciencias*, Bahia, v. 6, n. 1, 2021.

OLIVEIRA, Bruno. **corrosão do aço no concreto armado induzida por carbonatação: principais técnicas de recuperação.** Universidade Federal De Santa Maria Centro De Tecnologia (graduação em engenharia civil) - Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

PAULETTI, Cristiane. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação.** 2004. 178 p. Dissertação (Pós-graduação em engenharia civil) - Universidade Ferederal do Rio Grande do Sul, 2004.

PESTANA, Thiago Vale. **Os Impactos Sociambientais Decorrentes Da Atividade Siderúrgica Na Comunidade Pequía De Baixo Em Açailândia/Ma.** Orientador: Prof. Dr. Neli T. G. Machado. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) - Centro Universitário Univates, [S. L.], 2013.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RAISDORFER, Jander *et al.* **Carbonatação – Previsão Da Vida Útil Das Obras De Artes Especiais.** *Encontro Nacional De Conservação Rodoviária-ENACOR*, Foz do Iguaçu, 2015.

RIBEIRO, D.V. **Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos.** In: RIBEIRO, D. V. (Coord.). *Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção.* Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2018, p. 125-158.

RÉUS, Gio *et al.* **Influência Da Frente De Carbonatação Na Resistência Superficial Do Concreto Obtida Pelo Método Da Esclerometria**. Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT, 2016.

RIDOLPHI, Lohran *et al.* Deterioração do concreto armado. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 5, 2022.

Rodrigues, Lucas Albuquerque *et al.* **Carbonatação Em Estruturas De Concreto**. Revista Refaf Multidisciplinar, [S. L.], 2019.

SALES, Almir *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos: Corrosão e Degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2. ed. Rio de Janeiro: GEN- Grupo Editorial Nacional S.A. cap. 6, p. 125. Publicado pelo selo LTC, 2021.

SCHIAVINI, Daniele. **Análise Da Influência De Diferentes Tipos De Cimento Na Resistência Ao Ataque Por Sulfatos**. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Departamento Acadêmico De Engenharia Civil, Curitiba, 2018.

SILVA, Amanda *et al.* **Patologias em estruturas de concreto armado: estudo de caso**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 1, 2021.

SILVA, Leandro *et al.* **Correlação entre ensaios tecnológicos para concreto: ensaios de ultrassom, resistência à compressão e profundidade de carbonatação**. 67ª Reunião Anual da SBPC, Água Fria-PE, 2023.

SILVA, Geraldo *et al.* **Corrosão Em Estrutura De Concreto Armado Ocasionalada Pela Ação De Fertilizante E Ambiente Marítimo**. Congresso Brasileiro De Patologias Das Construções, Fortaleza, 2020.

SIQUEIRA, M.v. *et al.* **Análise De Carbonatação E Corrosão Por Íons Cloreto Em Uma Passarela Da Zona Oeste Do Recife**. Recife: Conpar2017, 2017.

SOUSA, Paulo *Et Al.* **Corrosão E Degradação Em Estruturas De Concreto**. Revista Científica Eletrônica De Ciências Aplicadas Da Fait Faculdade De Ciências Sociais E Agrárias De Itapeva-Fait, Itapeva, 2021.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2012.

VALENÇA, Daniel. **Análise Da Deterioração Do Concreto Por Carbonatação Natural Com Exposição Às Classes De Agressividade Ambiental Marinha E Respingos De Maré**. Trabalho De Conclusão Do Curso De Engenharia Civil (Graduação Em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná Departamento Acadêmico De Construção Civil, 2016.

ZUCARELI, Vitor *et al.* **Corrosão do aço em estruturas de concreto armado**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 2, 2021.