

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Jonathan Ngoyi Lubamvu

**ESTUDO DE CARBONATAÇÃO EM CONCRETO ARMADO:
CAUSAS, DIAGNÓSTICOS E PROPOSTA DE SOLUÇÕES**

Santa Maria, RS
2023

Jonathan Ngoyi Lubamvu

**ESTUDO DE CARBONATAÇÃO EM CONCRETO ARMADO: CAUSAS,
DIAGNÓSTICOS E PROPOSTA DE SOLUÇÕES**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti

Santa Maria, RS
2023

Jonathan Ngoyi Lubamvu

**ESTUDO DE CARBONATAÇÃO EM CONCRETO ARMADO: CAUSAS,
DIAGNÓSTICOS E PROPOSTA DE SOLUÇÕES**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Civil**.

Aprovado em dia de mês de 2023:

Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Dr. Joseanne Maria Rosarola Dotto (UFSM)

Dr. Rodrigo Goettems da Silveira (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e saúde para ir atrás dos meus sonhos. A toda minha família que apesar da distância me separou deles durante o meu período de formação, nunca deixaram de me dar apoio e acreditar em mim. Especialmente ao meu pai Patrice Ngoyi Lubamvu e a minha mãe Madeleine Miandabu Nzongola. Aos professores que tiveram total influência nesta fase de minha formação profissional. Ao professor Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti por ter aceitado me orientar, por ter me dado toda assistência me passando conhecimento para elaborar esse trabalho. Aos meus amigos e companheiros da UFSM, que contribuíram para minha integração, com quem tive a felicidade de compartilhar muitos bons momentos e que me incentivaram nos momentos difíceis. As empresas Engeplan e Pura Construções por me darem a oportunidade de aprimorar meus conhecimentos, com a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos na faculdade. Enfim, agradeço a todos que contribuíram e fizeram parte da minha trajetória de vida para conquistar esta formação.

RESUMO

ESTUDO DE CARBONATAÇÃO EM CONCRETO ARMADO: CAUSAS, DIAGNÓSTICOS E PROPOSTA DE SOLUÇÕES

AUTOR: Jonathan Ngoyi Lubamvu
ORIENTADOR: Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti

A carbonatação do concreto é uma das patologias mais frequentes nas estruturas de concreto armado, ele consiste na reação que ocorre quando o gás carbônico no concreto presente na atmosfera penetra na estrutura e reage com o líquido que se encontra nos poros do concreto de hidróxido de cálcio por causa da hidratação do cimento. Ela tem uma grande influência na vida útil da estrutura, por isso é muito importante estudar esse fenômeno, para achar algumas soluções para ele. Este trabalho tem por objetivo analisar por meio da revisão bibliográfica de literaturas técnicas sobre as causas da carbonatação do concreto, seus efeitos no desempenho da estrutura e propor soluções para reduzir sua ocorrência. As suas causas são diversas, tais como a concentração do CO_2 , a umidade Relativa do ar, a relação água/cimento, a porosidade, a cura, a granulometria de agregados, etc. Sendo que no concreto armado tem a presença do aço, sua principal consequência é aceleração do processo de corrosão da armadura, ela causa uma redução no pH do concreto, ocasionando assim uma despassivação da armadura. A forma mais eficiente de reduzir os danos causados pela carbonatação, é realizando manutenções preventivas em um período determinado para avaliar o estado em que se encontra a estrutura e começar o processo de reparo ou recuperação da estrutura para que a situação não piore.

Palavras-chave: Carbonataçã; Concreto; Aço;

ABSTRACT

CARBONATATION STUDY IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES: CAUSES, DIAGNOSTICS AND SOLUTION PROPOSAL

AUTHOR: Jonathan Ngoyi Lubamvu
ADVISOR: Dr. Marcos Alberto Oss Vaghetti

Concrete carbonation is one of the most frequent pathologies in reinforced concrete structures, it consists of the reaction that occurs when the carbon dioxide in the concrete present in the atmosphere penetrates the structure and reacts with the liquid which is found in the pores of the calcium hydroxide concrete due to cement hydration. It has a great influence on the service life of the structure. Because of this, it is very important to study this phenomenon, to find some solutions for it. This work has the objective to analyze, through a bibliographic review of technical literature, the causes of concrete carbonation, its effects on the performance of the structure and provide solutions to reduce its occurrence. Its causes are diverse, such as CO₂ concentration, relative air humidity, water/cement ratio, porosity, curing, granulometry of aggregates, etc. Since in reinforced concrete there is the presence of steel, its main consequence is the acceleration of the corrosion process of the reinforcement, it causes a reduction in the pH of the concrete, thus causing a depassivation of the reinforcement. The most efficient way to reduce the damage caused by carbonation is to carry out preventive maintenance in a certain period to evaluate the state of the structure and start the process of repair or recovery of the structure so that the situation does not get worse.

Keywords: Carbonation; Concrete; Steel;

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Esquema da ação da carbonatação.....	13
FIGURA 2 – Deslocamento do concreto e corrosão da armadura	14
FIGURA 3 – Grau de Carbonatação x Umidade Relativa do Ar	19
FIGURA 4 – Influência da relação água/cimento sobre a profundidade da carbonatação	20
FIGURA 5 – Comportamento de uma estrutura durante a vida útil	24
FIGURA 6 – Frasco de fenolftaleína.....	27
FIGURA 7 – Corpo de prova carbonatado.....	28
FIGURA 8 – Analisador Termogravimétrico	29
FIGURA 9 – Processo de realcalinização eletroquímica	37
FIGURA 10 – Aplicação de realcalinização eletroquímica em estrutura real.....	37
FIGURA 11 – Esquema de realcalinização química.....	38
FIGURA 12 – Área carbonatada e não carbonatada.....	38
FIGURA 13 – Remoção do concreto desagregado	39
FIGURA 14 – Limpeza do substrato e remoção de resíduos	40
FIGURA 15 – Tratamento superficial da armadura	40
FIGURA 16 – Recomposição superficial do concreto.....	41
FIGURA 17 – Argamassa polimerica.....	41

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classes de agressividade ambiental	30
TABELA 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	31
TABELA 3 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
2	CARBONATAÇÃO	12
2.1	CAUSAS.....	15
2.1.1	Causas relacionadas aos erros na concepção da estrutura	15
2.1.2	Causas relacionadas aos erros no método construtivo da estrutura	17
2.1.2.1	Concentração do CO ₂	18
2.1.2.2	Umidade Relativa do Ar.....	18
2.1.2.3	Relação água/cimento e a porosidade	20
2.1.2.4	Cura.....	21
2.1.2.5	Granulometria de Agregados.....	22
2.2	CONSEQUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO EM EDIFICAÇÕES	22
2.2.1	Corrosão da armadura	22
2.2.2	Durabilidade e vida útil	23
3	DIAGNÓSTICO, PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO	25
3.1	PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES DA CARBONATAÇÃO NO CONCRETO ARMADO.....	25
3.2	MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR O GRAU DE CARBONATAÇÃO.....	25
3.2.1	Ensaio de carbonatação natural	25
3.2.2	Ensaio de carbonatação acelerado	26
3.2.3	Medição da profundidade de carbonatação	26
3.2.3.1	Indicadores de pH.....	27
3.2.3.2	Petrografia	28
3.2.3.3	Termogravimetria.....	28
3.3	CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL.....	29
3.4	PREVENÇÃO	33
3.4.1	A concepção do projeto estrutural	33
3.4.2	Dosagem do concreto	33

3.4.3	Execução da estrutura	34
3.4.4	Adições.....	34
3.4.5	A manutenção preventiva	35
3.5	REPARO, REFORÇO E RECUPERAÇÃO.....	36
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o principal material utilizado na construção de casas, edifícios, pontes e outros. Isto se deve principalmente à sua durabilidade, sua resistência quando endurecida e, também, a sua maleabilidade antes de seu endurecimento, o que facilita seu transporte e sua moldagem em formas. Ele vem sendo utilizado desde a civilização egípcia até nos dias de hoje, independentemente da localização e do ambiente.

O concreto constitui um sistema estrutural composto por uma massa de concreto (que inclui cimento, água e agregados miúdos e graúdos) e geralmente ele é acompanhado de aço para aumentar sua resistência às tensões de compressão e tração, esse conjunto forma o concreto armado. Por mais que, ao usar aço no concreto ele apresenta muitos benefícios para a construção civil, tais como sua ductilidade e sua resistência a tração e compressão, deve-se tomar alguns cuidados na elaboração do projeto estrutural de uma construção em concreto armado e na tecnologia de execução a ser utilizada. No caso contrário, podem aparecer problemas quase imediatos ou com o passar do tempo na estrutura.

Dentro das patologias que podem ser causadas por essas falhas podemos citar: trincas, fissuras, lixiviação, carbonatação, corrosão das armaduras e abrasão. Essas manifestações patológicas podem comprometer a durabilidade das estruturas, podendo ocasionar a redução da longevidade da estrutura.

A corrosão da armadura é o fenômeno de deterioração mais frequente das estruturas de concreto armado, podendo ter um impacto negativo tanto na parte estética, como em relação à segurança. A carbonatação do concreto pode iniciar ou acelerar a ocorrência da corrosão da armadura, por isso é muito importante ficar atento a essa patologia.

A carbonatação do concreto é a penetração do gás carbônico no concreto, reduzindo seu pH para valores < 9 , o que causa um rompimento na capa de passivação da armadura, o que deixa as barras de aço mais vulnerável para ocorrência da corrosão. Normalmente o concreto endurecido tem um pH entre 12 a 14, neste pH e com a presença do oxigênio, se cria uma capa de óxido que o proteja contra a corrosão HELENE (1986).

Para que o processo de carbonatação aconteça é preciso ter a presença da umidade, gás carbônico e oxigênio no concreto. O dióxido de carbono (CO_2) se infiltra

nos poros do concreto, e na presença da umidade e este reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que é produzido durante as reações de hidratação do cimento, formando os carbonatos (CaCO_3) e água. O carbonato de cálcio por si não danifica diretamente o concreto, mas durante a sua formação os álcalis da pasta são consumidos e isso reduz pH, dessa forma o concreto se torna mais frágil e o aço mais suscetível a ataques de agentes externos (CALAZANS, 2013).

Devido a essa problemática, esta pesquisa visa estudar as causas da carbonatação relacionadas aos erros na concepção da estrutura, no método construtivo da estrutura e na execução da estrutura e propondo soluções preventivas, de reparo, de reforço e de recuperação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo analisar por meio da revisão bibliográfica de literaturas técnicas sobre as causas da carbonatação do concreto e seus efeitos no desempenho da estrutura.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as origens das manifestações dessa patologia;
- Apresentar as principais metodologias que são utilizadas para determinar o grau de gravidade da patologia;
- A partir do diagnóstico e conhecidas as causas das patologias, apontar quais as soluções viáveis para as mesmas.

2 CARBONATAÇÃO

Sendo assim, as estruturas de concreto armado, são aquelas constituídas pela associação do concreto às barras de aço, que estabelece um sólido único capaz de promover diversos benefícios à construção e às construtoras. Uma vez que essa associação é responsável por aproveitar as principais vantagens de ambos os materiais (concreto e aço), principalmente, relacionadas a alta resistência (ao fogo, água, eventos climáticos, choques e vibrações) e durabilidade, bem como ao baixo custo (aquisição, execução e manutenção). Entretanto, apesar de sua eficiência e facilidade de aquisição, este tipo de material está sujeito a sofrer alterações em suas características ao longo dos anos, dependendo do ambiente em que se encontra inserido e das interações entre seus elementos (constituintes) com agentes externos (ácidos, bases, sais e gases) (SILVA, 2011).

Uma das manifestações patológicas mais severas encontradas nestas estruturas, especialmente, nos centros urbanos refere-se à carbonatação. Uma vez que, os compostos que podem desencadear este fenômeno se encontram facilmente no ar atmosférico destes locais e a uma alta concentração, como é o caso do dióxido de carbono (CO_2), gás sulfídrico (H_2S) e dióxido de enxofre (SO_2) (ANDRADE, 2018).

A carbonatação, segundo Delling e Cuani (2018), refere-se a um fenômeno físico-químico, resultante da reação da interação destes gases ácidos (presentes na atmosfera do ambiente) com os produtos alcalinos do concreto (de hidratação do cimento), que tende a se desenvolver lentamente e ser responsável por reduzir o pH (alcalinidade) e mudar a microestrutura do material, assim como provocar a despassivação da armadura, podendo ainda ocasionar o processo de corrosão da mesma, uma vez que, cria um ambiente favorável ao ataque de agentes externos como água e cloretos, também presentes na atmosfera.

Vagheti (2005), diz que a carbonatação é o resultado da reação entre CO_2 presentes da atmosfera que penetrou no concreto e o líquido que se encontra nos poros do concreto saturado de hidróxido de cálcio por causa da hidratação do cimento.

De acordo com Gomes (2016), a reação básica de carbonatação consiste no processo em que dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera de exposição da estrutura, penetra nos poros ou fissuras do concreto e tem acesso a pasta de cimento endurecida (composta de vazios e água). Ao adentrar, o gás reage com o hidrato da pasta e é dissolvido na umidade do material (na película úmida), formando assim, um

composto nomeado como ácido carbônico (H_2CO_3), caracterizado como o agente agressivo deste fenômeno (REIS, 2001).

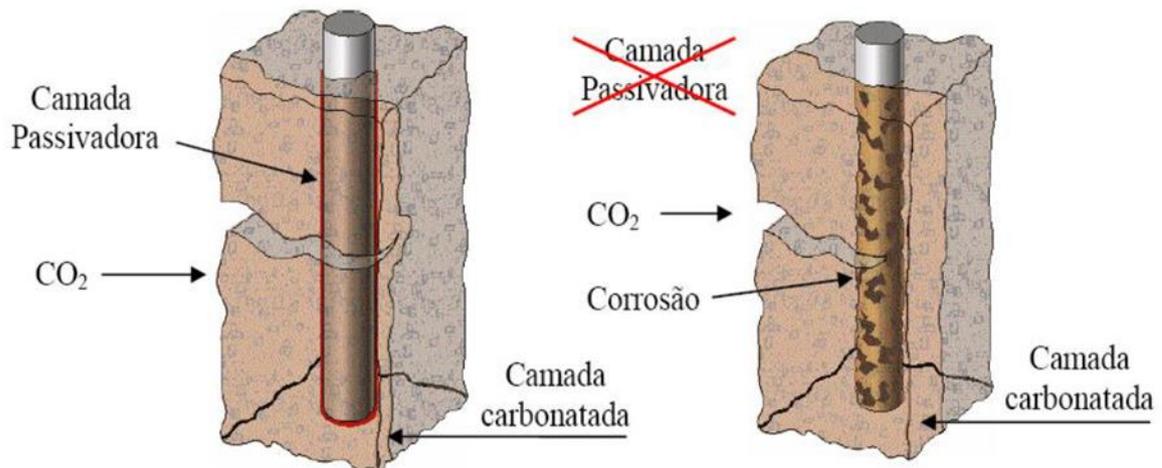
Martins (2011) complementa que esta interação provoca também alterações físicas e químicas no material, especialmente, relacionadas a resistência, permeabilidade e ao módulo de deformação e dureza. Enquanto que, Gomes (2016), ressalta que para estas reações ocorrerem é necessária, portanto, a existência de um poro líquido, para que o CO_2 possa ser dissolvido.

A concentração de dióxido de carbono na atmosfera é o resultado da combustão de carvão e derivados de petróleo, empregados para fins industriais, domésticos e/ou de transporte (REIS, 2001). Desta forma, a atmosfera contaminada com gases carbônicos e sulfúricos se encontra em constante contato com as superfícies das estruturas de concreto e quando na presença de umidade do ambiente, poderão a vir se transformar em ácidos, responsáveis por produzir ataques agressivos ao material, bem como contribuir para sua corrosão (VIEIRA, 2016).

Apesar da carbonatação progredir lentamente da superfície para o interior da estrutura, o processo também atua na formação do carbonato de cálcio (CaCO_3) e, conseqüentemente, promove a redução do pH do concreto a valores próximos de 8,5 (DELLING; CUANI, 2018). Sendo que o pH original e normal do material se encontra entre os valores de 12,5 e 13,5 (REIS, 2001). Quanto maior a concentração de CO_2 , menor será o pH, ou mais espessa será a camada de concreto carbonatada (CARMO, 2009). Alves (2019) relata que o carbonato de cálcio pode se acumular ainda, nas juntas de assentamento dos blocos, de revestimentos cerâmicos ou em fissuras nas estruturas de concreto.

Sendo assim, como pontua Andrade (2018), o processo de carbonatação inicia com a entrada do CO_2 , seja por um poro ou fissura, na região superficial do concreto. Em qual adentra para o seu interior gradualmente e assim, avança pela seção, da face externa para o interior da peça, criando uma camada carbonatada que cresce em espessura com o decorrer do tempo e atua na desp passivação das armaduras, como ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Esquema da ação da carbonatação



Fonte: Martins (2011, p. 9).

Segundo Andrade (2018), a carbonatação é capaz de promover a fissuração do concreto, o deslocamento do cobrimento do aço, a redução da seção da armadura e favorecer a perda de aderência desta com o concreto. Por meio da Figura 2 é possível notar o concreto carbonatado, que contribui para a corrosão da armadura e o deslocamento do material.

Figura 2 – Deslocamento do concreto e corrosão da armadura



Fonte: Andrade (2018, p. 24).

A carbonatação representa, portanto, uma anomalia originada em uma estrutura de concreto armado, a qual pode ser gerada por meio de um conjunto de processos que facilitam, especialmente, a entrada e dissolução de gases no corpo estrutural (VIEIRA, 2016). Esta anomalia é capaz de afetar e comprometer diretamente a durabilidade e, conseqüentemente, a vida útil das construções, bem

como favorecer o surgimento de novas patologias estruturais, em especial, a corrosão de armaduras, a desagregação do concreto, como foi possível observar na Figura 2. Em casos graves, em que a carbonatação do concreto esteja avançada no corpo estrutural, pode comprometer a qualidade, a resistência e a capacidade de suporte da edificação, o que conseqüentemente, a torna suscetível a acidentes ou desabamentos, reflexo do colapso parcial ou total da estrutura (ARIVABENE, 2015).

2.1 CAUSAS

A carbonatação, assim como as demais patologias estruturais que as edificações de concreto armado se encontram expostas a apresentar, podem ser fruto de causas naturais, humanas ou acidentais. Entretanto, tais problemas têm suas origens motivadas por falhas, que ocorrem basicamente nas três principais etapas do ciclo de vida da construção, que são resumidas em: concepção, execução e utilização (ANDRADE, 2018). A cada etapa, como ressalta Couto (2017), a construção pode estar exposta a sofrer deficiências que, conseqüentemente, a curto ou longo prazo, podem promover o aparecimento de manifestações patológicas, especialmente, provenientes da carbonatação.

De acordo com Costa (2018), tais deficiências, no planejamento, podem gerar conseqüências desastrosas para uma obra, promovendo inúmeros prejuízos. Um ato falho ou ainda, um descuido em uma determinada atividade, pode vir a provocar sérios danos, gerando, normalmente, atrasos e aumento dos custos, que colocam em risco o sucesso do empreendimento. Silva (2018) complementa que a falta de planejamento, controle e execução adequada de obras tende a prejudicar o seu prazo final, a sua qualidade e a viabilidade econômica.

2.1.1 Causas relacionadas aos erros na concepção da estrutura

A concepção constitui a etapa responsável pela definição do projeto (escopo inicial) e de suas necessidades (recursos financeiros, materiais e mão-de-obra), até a aprovação da proposta para iniciar a execução (SILVA; CORRÊA; RUAS, 2018). Neste processo, ocorre a determinação das ações necessárias, para atingir o objetivo e o escopo, para qual se propõe o projeto. Desta forma, é responsável por definir o escopo final do projeto e assim, refinar os objetivos, de modo a detalhar tudo aquilo

que será executado no projeto (planos de custo, prazo, qualidade, comunicação, recursos humanos, aquisições e riscos) (RODRIGUES, 2014).

Dentre os erros e, conseqüentemente, falhas, que podem ocorrer na etapa de concepção da estrutura e assim, favorecer a ocorrência da carbonatação no concreto, segundo Carmo (2009), estão: Modelização inadequada da estrutura; Má avaliação das cargas; Detalhamento errado ou insuficiente; inadequação do ambiente; incorreção na interação solo-estrutura; e, incorreção na consideração de juntas de dilatação. Uma vez que, a sobrecarga da estrutura facilita também, em maior grau, o aparecimento de trincas e fissuras, que, conseqüentemente, contribuem para o fenômeno de carbonatação, devido proporcionarem aberturas que permitem que o CO₂ ou outros gases, adentrem o corpo estrutural.

Já de acordo com Couto (2017), o cobrimento (também chamado como camada de concreto de cobrimento) representa o fator mais determinante para o processo de carbonatação, por ser responsável por agir na proteção física (contra agentes agressivos, oxigênio e umidade) e química (garantia do meio alcalino para que não ocorra a despassivação) da armadura. Desta forma, constitui um elemento de grande importância, que deve ser bem escolhido, pensado e dimensionado. As especificações de projeto inadequadas (frente à agressividade ambiental), assim como erros executivos, podem, por exemplo, ocasionar espessura desuniforme ao longo de peças estruturais, facilitando e acelerando processos de carbonatação e corrosão. Gomes (2006) complementa que o cobrimento deficiente representa o principal caminho para o início e a propagação de patologias no concreto armado.

Por esta questão, o cobrimento deve levar em consideração as características e propriedades dos materiais componentes do concreto, bem como da atmosfera, do microclima, das condições de preparo e da aplicação do concreto, entre outros (GOMES, 2006). Além disso, deve estar de acordo com a NBR 6118:2014, que determina para qualquer barra de armadura, é obrigatório o cobrimento de concreto pelo menos (mínimo) igual ao seu diâmetro e deve estar em acordo com a categoria de agressividade e, portanto, com as condições do meio em que será inserida (COUTO, 2017).

Um outro ponto que aborda Martins (2011), é que cuidados especiais devem ser tomados não só direcionados a espessura do cobrimento, mas de garantir segurança na mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desmoldagem do material, com a finalidade de favorecer a menor permeabilidade e melhor qualidade

do concreto. Bazzan (2014) relata que um revestimento de boa qualidade, com baixa porosidade, além de dificultar a penetração dos agentes agressivos, atua como uma barreira adicional. Portanto, é fundamental que seja projetado e executado de forma correta, a fim de garantir o adequado desempenho planejado da estrutura e, conseqüentemente, a vida útil das estruturas.

2.1.2 Causas relacionadas aos erros no método construtivo da estrutura

Em relação a fase de execução, ou seja, a etapa responsável por construir a edificação e/ou obra, e assim, empregar o método construtivo escolhido no canteiro de obras, há outros fatores que podem favorecer o aparecimento de manifestações patológicas. Segundo Rodrigues (2014), o processo de execução tem por objetivo coordenar os recursos necessários para realizar o que foi planejado e, portanto, integrar pessoas e recursos, com a finalidade de executar o trabalho definido no plano do projeto e assim, atender as especificações do mesmo.

Entretanto, no Brasil, há um relativo improviso nos canteiros, de modo que, as obras são executadas, geralmente, de forma artesanal e sofrem inúmeras improvisações, sem nenhum planejamento formal e garantia do cumprimento do prazo e orçamento, previamente estabelecidos. O que configura, segundo Silva (2018), uma deficiência no planejamento e controle, assim como evidencia a principal causa da baixa produtividade do setor, de suas elevadas perdas e baixa qualidade de produtos.

Segundo Costa (2018), cerca de 71% dos projetos obtêm atraso em razão das mudanças constantes no escopo durante a fase de execução, e 70% devido o não cumprimento dos prazos estabelecidos. Já a mesma pesquisa, em 2014, demonstrou que 57% dos projetos não alcançaram os resultados esperados de custo, tempo e satisfação do cliente. Edificações novas já vêm apresentando, em poucos anos, inúmeras manifestações patológicas, especialmente, de carbonatação e corrosão de armaduras (COUTO, 2017).

Neste contexto, com base em Carmo (2009), as principais causas estão, quase sempre, associadas a deficiência da concretagem, a inadequação de escoramentos e fôrmas, as deficiências nas armaduras, a utilização incorreta de materiais na construção e a inexistência de controle da qualidade.

Entretanto, de acordo com Andrade (2018), o desenvolvimento dos mecanismos da carbonatação dependem diretamente de fatores relacionados,

especialmente, às condições do meio e da matriz cimentícia, sendo estes: a concentração de CO₂ na atmosfera; umidade relativa; relação água/cimento e relação água/agregado; cura; granulometria do agregado; porosidade e permeabilidade. De modo que, são imprescindíveis para determinar a ocorrência da carbonatação e o seu desenvolvimento (grau) ao decorrer do tempo.

2.1.2.1 Concentração do CO₂

A concentração de CO₂ na atmosfera constitui um fator extremamente indispensável para que o processo de carbonatação ocorra e se desenvolva. Além disso, segundo Andrade (2018), a velocidade do processo aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração deste gás, principalmente, para concretos de elevada relação água/cimento.

Sendo assim, quanto maior a concentração de CO₂ no ambiente, mais rapidamente este composto irá atingir a armadura, podendo influenciar significativamente até mesmo na profundidade carbonatada. Entretanto, esta concentração varia de acordo com o ambiente e, por exemplo, em áreas rurais acredita-se que a concentração de CO₂ esteja entre 0,03% a 0,05%, enquanto que em atmosfera urbanas se encontra entre 0,1% a 1,2%, devido ao grande e excessivo tráfego de veículos pesados (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

Já em ambientes viciados (como silos de certos materiais a granel), a concentração pode vir a chegar a 1,8%, e em ambientes específicos (túneis, garagens, industriais) pode ainda vir a ser maior (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011). O que reflete um quadro grave desfavorável a qualidade das estruturas, uma vez que, a carbonatação é determinada pelas características do concreto e da fração de CO₂ disponível na atmosfera. E demonstra a importância de se executar obras em acordo com as características, especialmente, do ar atmosférico da região.

2.1.2.2 Umidade Relativa do Ar

A velocidade do processo de carbonatação, do exterior para o interior do concreto, além de depender da concentração de CO₂, requer uma estrutura da rede de poros do material, bem como das suas condições de umidade (BAZZAN, 2014).

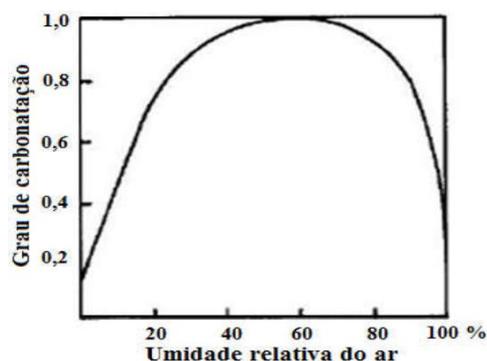
Visto que, quando há água nos poros, o gás não sofre difusão e, portanto, não reage e nem atua na produção de compostos agressivos.

Vagheti (1999) complementa essa explicação afirmando que “Quando os poros estão 100% preenchidos com água, existe uma baixa difusão do CO_2 e isso reduz muito ou até elimina a ocorrência da carbonatação. Mas por outro lado, quando não há nenhuma umidade presente nos poros, a carbonatação não vai ocorrer também, pois faltará água para reagir com o CO_2 . Dessa forma, Vagheti (1999) diz que quando a umidade do local onde está localizado a estrutura se mantém entre 50 e 80%, a velocidade de avanço da frente de carbonatação é alta.

Pode-se afirmar que em poros saturados de água, o processo de carbonatação quase não ocorre, devido à baixa difusão do CO_2 , enquanto que em poros excessivamente secos, o gás penetra facilmente, mas faltará água para que a reação ocorra. Por isso, em ambientes sujeitos a intempéries frequentes, como chuva e sol intenso, a carbonatação da superfície do concreto é lenta ou praticamente nula. Por outro lado, em locais protegidos onde a umidade se mantém na faixa entre 50 e 80%, a velocidade de avanço da frente de carbonatação é alta, contribuindo para a deterioração do concreto num prazo mais curto.

De acordo com Couto (2017), a umidade relativa do ambiente exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do concreto e assim, sobre a velocidade de difusão do CO_2 . Dellling e Cuaní (2018) relatam que as maiores velocidades no fenômeno de carbonatação ocorrem, geralmente, em umidade relativa entre 60% e 75%, enquanto que Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2010), apontam que este processo não é perceptível em umidades inferiores a 50% (inexistência de água suficiente para que as reações aconteçam), como demonstra a Figura 3.

Figura 3 – Grau de Carbonatação x Umidade Relativa do Ar



Fonte: Verbeck (1958)

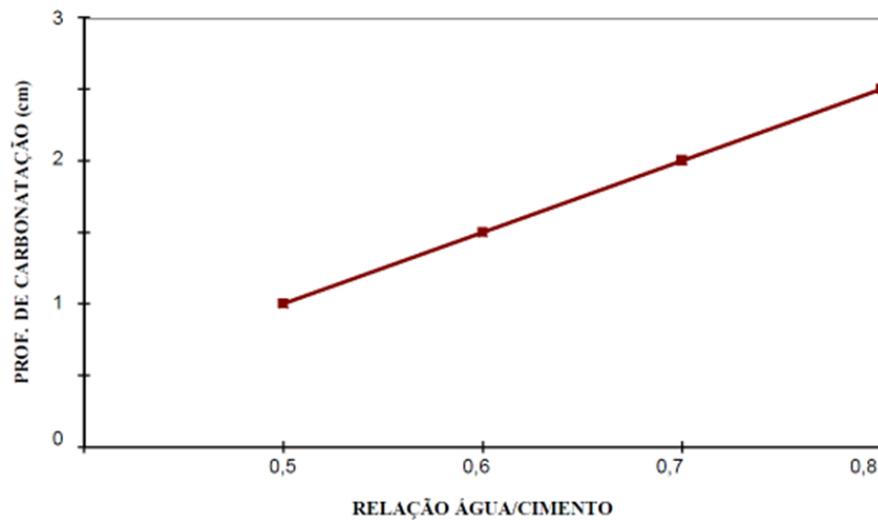
Sendo assim, como aponta Couto (2017), a carbonatação é altamente dependente da umidade relativa do concreto. Além disso, a hidratação do cimento, a porosidade e as outras propriedades do concreto são afetadas diretamente pelas condições de umidade do ambiente. Com base em Martins (2011), em ambientes de baixa umidade relativa do ar, há maior perda de água livre, o que, conseqüentemente, reduz a quantidade livre disponível para reagir com o CO₂.

2.1.2.3 Relação água/cimento e a porosidade

Um outro fator determinante que pode induzir o aparecimento da carbonatação está associado a relação água/cimento, que é responsável por determinar a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido, bem como suas propriedades mecânicas finais (compacidade ou porosidade da pasta) (GOMES, 2006). Gomes (2006) aponta que representa um dos parâmetros mais importantes, visto que quanto maior esta relação, maior será a porosidade, permeabilidade e, conseqüentemente, a intensidade (profundidade e velocidade) de propagação do fenômeno, como ilustra a Figura 4.

Segundo Couto (2017) o processo de difusão da carbonatação depende diretamente da porosidade do concreto e assim, da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento (maior tempo possível de impedimento de evaporação da água da pasta). Gomes (2006) apontam que, portanto, a permeabilidade do concreto é diretamente proporcional a sua relação água-cimento, de modo que, a durabilidade é inversamente proporcional à esta relação, dentro dos limites práticos. O mesmo autor ainda relata que a ocorrência de porosidade neste caso, é causa determinante da deterioração da estrutura de concreto armado.

Figura 4 – Influência da relação água/cimento sobre a profundidade da carbonatação



Fonte: Vénuat (1969).

2.1.2.4 Cura

Segundo Couto (2017), a carbonatação é um fenômeno direto e altamente dependente da cura do concreto, levando em consideração que esta etapa construtiva que determina as condições de hidratação da camada de cobrimento dos elementos da estrutura de concreto armado. A existência de falhas de execução, como pontua Bazzan (2014), pode provocar alterações na estrutura física do concreto e favorecer o aparecimento de manifestações como fissuras, segregação do concreto e perda da massa de cimento, que tende a acelerar a carbonatação, em razão da heterogeneidade do material. Martins (2011) complementa que, a cura deficiente ou a falta desta, pode ocasionar o aparecimento de uma rede de capilares na superfície do material e assim, facilitar o acesso de agentes agressivos.

Por esta questão, a cura deve ser bem estruturada e levando em consideração a temperatura, umidade e concentração de exposição, uma vez que, afeta as condições de hidratação dos primeiros milímetros superficiais. Ou seja, deve ser executada em um ambiente com temperatura e umidade controladas, a fim de evitar o surgimento do fenômeno de carbonatação e em caso de ocorrência, que sua profundidade no material seja menor. Além disso, o aumento do tempo de cura minimiza retrações decorrentes da secagem (WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

Como ainda aborda Bazzan (2014), quanto maior for o tempo e a qualidade da etapa de cura, mais compacta será a microestrutura e, conseqüentemente, melhores serão as propriedades do concreto, ou seja, maior será o grau de hidratação do cimento e a resistência, bem como menor será a porosidade e, conseqüentemente, permeabilidade e carbonatação.

2.1.2.5 Granulometria de Agregados

Os agregados aplicados, durante a execução da obra, também são capazes de favorecer o fenômeno, uma vez que, dependendo do tipo, da dimensão e da forma destes, podem dificultar o manejo do concreto fresco, a durabilidade do concreto endurecido e da resistência do material, especialmente, à difusão de CO₂ (MARTINS, 2011). Mehta e Monteiro (2014) relatam que se o concreto é produzido a partir de agregados de forma arredondada, se torna mais fácil de ser lançado, além do que, tende a ser mais denso e ter maior resistência perante a penetração de agentes agressivos, como no caso dos gases atmosféricos.

Sendo assim, a forma do agregado deve ser considerada e prevista, a fim de executar um revestimento adequado e eficiente, visto que se forem aplicados, por exemplo, agregados leves, que costumam ser mais porosos, poderá favorecer a formação de caminhos que favorecem e tornam propícia a carbonatação e, portanto, a difusão de CO₂ (MARTINS, 2011). Mehta e Monteiro (2014) citam também que não é ideal a execução de agregados de forma lamelar ou alongada, visto que tendem a contribuir para um acúmulo de água na parte inferior e assim, para um grau de carbonatação mais severo.

2.2 CONSEQUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO EM EDIFICAÇÕES

Junto com o processo de carbonatação ocorrem algumas alterações na estrutura, são elas de natureza química, física e mecânica. Possan (2010) relata que as degradações das estruturas causadas pela carbonatação reduzem a vida útil da edificação.

2.2.1 Corrosão da armadura

O aço dentro do concreto armado está protegido contra os agentes agressivos pelo cobrimento de concreto que desenvolve 2 grandes papéis. Segundo Gentil (2011), primeiramente ele funciona como um isolante físico da armadura e segundo como um isolante químico, por causa da sua alta alcalinidade quando o concreto apresenta uma boa qualidade, e isso permite manter a armadura na condição de passividade, ou seja, favorece a formação e manutenção de um filme óxido, aderente a superfície do aço, que evita a dissolução anódica dos íons ferrosos (FARIAS; TEZUKA, 1992).

Apesar do processo de carbonatação avançar devagar da superfície para o interior, com o passar dos anos ela causa uma redução no pH do concreto, ocasionando assim uma desp passivação da armadura (VAGHETTI, 1999).

Segundo Farias e Tezuka (1992) afirmam que quando os fatores que podem causar a corrosão da armadura estão presentes e que o filme de passivação está enfraquecido ou destruído, o processo de corrosão pode acontecer.

Mas, mesmo que a armadura esteja desp passivada e desde que os agentes agressivos não estejam ainda presente no concreto, se o cobrimento de concreto ainda estiver em boas condições, ou seja, sem trincas, fissuras e porosidades, ele ainda cumprira seu papel de impedir a entrada de agentes externos, tais que: Oxigênio, Eletrólito, Íons de cloretos; e não acontecerá a corrosão da armadura. Gentil (2003) e Helene (1993).

2.2.2 Durabilidade e vida útil

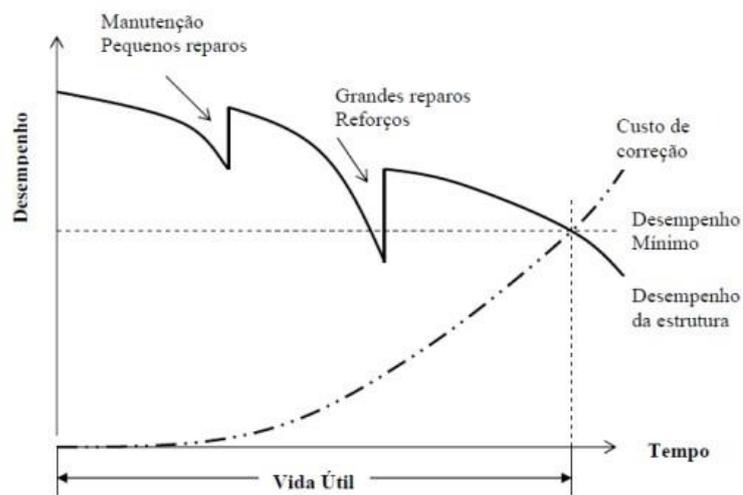
Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), a vida útil de projeto é o período durante o qual a estrutura mantém o desempenho pelo qual foi projetado, sem precisar fazer intervenções significativas, apenas as intervenções previstas no manual de manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor. Esse período varia entre 50 e 60 anos.

Como aponta Ribeiro *et al.* (2014), durabilidade e vida útil têm diferenças conceituais. Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), a durabilidade é a capacidade que a edificação tem de resistir aos fatores ambientais previstos e definidos durante a elaboração do projeto, em acordo entre o projetista e o contratante.

Porém o período da vida útil e a durabilidade da estrutura pode ser aumentado ou reduzido por uma série de fatores, cujo um deles é a carbonatação do concreto. Como vimos antes, a carbonatação é um dos principais fenômenos físico-químicos que pode reduzir a vida útil e a durabilidade das estruturas de concreto armado.

A Figura 4Figura 5 mostra o comportamento de uma estrutura durante a vida útil.

Figura 5 – Comportamento de uma estrutura durante a vida útil



Fonte: Helene (1992).

3 DIAGNÓSTICO, PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO

O mundo está cada vez mais tendo avanços tecnológicos em diversas áreas, e isso não é diferente para área da construção civil. Os métodos construtivos e as tecnologias dos materiais evoluíram e continuam evoluindo com o passar dos anos, mas Azevedo (2011) afirma que apesar desses progressos, as manifestações das patologias nas edificações continua sendo frequente.

Uma vez identificada essas patologias, o processo de correções na estrutura deve ser iniciado. Segundo Helene (1992), o diagnóstico obtido depois da análise, as características do local que sofrerá a intervenção e o tipo de uso da estrutura vão determinar o tipo de tratamento a ser utilizado.

3.1 PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES DA CARBONATAÇÃO NO CONCRETO ARMADO

Como já mencionado anteriormente, o processo de carbonatação do concreto acelera a ocorrência da corrosão da armadura no caso de uma estrutura de concreto armado. Porém, nem sempre as manifestações externas características dessa patologia podem ser observadas visualmente, principalmente em estruturas onde a armadura não é aparente.

A melhor forma de determinar se o concreto está carbonatado ou não, e qual a profundidade da carbonatação é realizando ensaios específicos.

3.2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR O GRAU DE CARBONATAÇÃO

Os ensaios utilizados para estudar o processo de carbonatação do concreto podem ser divididos em 2 grandes tipos, ensaio de carbonatação natural e acelerado. Portanto, para determinar a profundidade da carbonatação são utilizados outros métodos tais como: indicadores de pH, petrografia, difração de raio X, espectrometria de infravermelho, termogravimetria, etc.

3.2.1 Ensaio de carbonatação natural

Conforme Pauletti (2009) e Saldanha (2013), esse ensaio consiste em expor o concreto às condições de degradação reais do ambiente, para simular a agressão que sofre uma estrutura real.

Os resultados obtidos através desse ensaio servem como base de comparação para os ensaios acelerados, estabelecendo uma relação de tempo e profundidade de carbonatação.

Esse ensaio acaba sendo pouco utilizado, porque é preciso um tempo muito longo para ser realizado como destaca Possan (2010), pois as reações decorrentes da difusão do CO₂ nos poros com os compostos alcalinos dos produtos de hidratação são relativamente lentas nas estruturas de concreto em dado ambiente. Esse tempo pode levar até 20 anos.

As maiores vantagens que os ensaios naturais apresentam em relação aos ensaios acelerados são em relação à interação real com o meio ambiente, a exposição às intempéries e a possibilidade de avaliação da degradação (JOHN, 1987).

3.2.2 Ensaio de carbonatação acelerado

Esse ensaio tem como objetivo acelerar o processo de neutralização, expondo o concreto a altas taxas de concentração de dióxido de carbono em uma câmara de carbonatação (PAULETTI, 2009; FERREIRA; FRÉZ; MEDEIROS, 2013).

Uma das grandes vantagens deste ensaio, é que ela permite reduzir o tempo em que se obtém os resultados, pois por ser em condições controladas, é possível criar um ambiente mais agressivo do que o natural.

Portanto, Possan (2004) destaca que o tempo do ensaio acelerado não pode ser muito curto, porque pode acontecer da reação completa da carbonatação não ter ocorrido ainda e isso não representa uma situação real.

Ao realizar esse tipo de ensaio deve-se tomar cuidado em relação ao teor do CO₂ em câmaras. Castellote *et al.* (2009) destacam que os teores de concentração de CO₂ acima de 3% modificam a estrutura dos silicatos, o que por sua vez, modifica também a microestrutura dos compostos hidratados da pasta cimentícia.

3.2.3 Medição da profundidade de carbonatação

Para determinar a profundidade da carbonatação do concreto pode ser utilizado diferentes métodos, dentre deles: indicadores de pH, petrografia, difração de raio X, espectrometria de infravermelho, termogravimetria, etc.

3.2.3.1 Indicadores de pH

Esse é o método mais utilizado, isto se deve, principalmente ao fato de ser fácil execução e o menor custo. Eles são substâncias que mudam de cor na presença de íons H^+ e OH^- livres em uma solução, ou seja, eles indicam se uma solução é ácida ou básica.

Existem várias soluções tais como: fenolftaleína, timolftaleína e amarelo de alizarina. A fenolftaleína é a mais utilizada (Figura 6). Ele é executado pela utilização de uma solução com 1% de fenolftaleína, em 70% de álcool etílico e 29% de água destilada. A sua cor muda a valores de pH entre pH 8,2 e pH 9,8, apresentando uma coloração vermelho-carmim para pH superiores a 9,8 e permanecendo incolor para pH inferiores a 9.

Figura 6 – Frasco de fenolftaleína



Fonte: (INTERJET ARTIGOS PARA LABORATÓRIOS, 2023).

De acordo com Kulakowski (2002) a solução deve ser borrifada na superfície dos corpos de prova ou estruturas inspecionadas, a área carbonatada do concreto apresentará uma coloração cinza e, a área sem presença de carbonatação, a coloração vermelho-carmim (Figura 7).

Figura 7 – Corpo de prova carbonatado



Fonte: Ribeiro (2009).

3.2.3.2 Petrografia

A priori a petrografia é uma técnica utilizada com objetivo de descrever rochas, mas ela pode ser utilizada também para descrição de outros materiais, como fósseis, concretos, solos, amianto, etc.

Ela consiste em obter uma lâmina fina do objeto que queremos analisar e utilizar um microscópio tradicional ou eletrônico para ter uma boa descrição visual do objeto. O uso do microscópio eletrônico pode fornecer maior detalhamento, como por exemplo composição química de um ponto específico do objeto.

3.2.3.3 Termogravimetria.

O ensaio de A termogravimetria (TGA) mede a variação de peso que ocorre no material analisado em função da variação de temperatura imposta (RAJISHA 2011) (Figura 8). É um dos principais ensaios térmicos utilizados na caracterização de materiais, tais como: o teor de hidratos formados, a portlandita consumida por atividade pozolânica e a carbonatação da amostra.

Em relação a análise da carbonatação, ela fornece a proporção existente dos hidróxidos presentes no material não carbonatado e os carbonatos nas amostras carbonatadas, que pode ser visualizada através da curva a derivada (DTG).

Para realização desse ensaio, utiliza-se um equipamento composto por um sistema de aquecimento que pode ser manual ou eletrônico e por uma microbalança que mede a massa da amostra do início ao fim do ensaio.

Figura 8 – Analisador Termogravimétrico



Fonte: (ELTRA, 2023; LABCONTROL, 2023).

As normas ASTM D6370 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995), ISO 9974 e a ISO 11358 determinam os parâmetros desse ensaio, de acordo com o objetivo do ensaio e o perfil de aquecimento.

3.3 CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Esse é um fator que tem uma grande influência na velocidade com que o processo de carbonatação concreto pode acontecer. Quanto mais agressivo quimicamente é o ambiente onde está localizada a edificação o processo pode ocorrer com ainda mais rapidez. Dessa forma, a vida útil da estrutura depende muito do ambiente em que está localizado como afirma Rostam (1996 apud BRAUN, 2003).

De acordo O FIB Model Code 2010 (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 2010), as edificações devem ser projetadas, construídas e ocupadas para que elas proporcionem uma segurança, funcionalidade e uma boa aparência visual

durante o período correspondente à sua vida útil, considerando as influências que ela sofrerá relacionadas ao ambiente em que está situada.

Já a versão atualizada da NBR 6118 determina que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de forma que sob a influência do ambiente esperado, ela tenha um bom desempenho conservando a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil, de acordo com os requisitos definidos pelo autor do projeto estrutural.

Dessa forma, a ABNT NBR 6118 possui diversas considerações e prescrições com o objetivo de garantir a durabilidade das estruturas de concreto armado. Essas considerações determinam alguns critérios de projeto a serem adotados em função da classificação de agressividade do ambiente à estrutura do concreto, tais como: valores mínimos da resistência mecânica, valores mínimos do cobrimento da armadura e a máxima abertura de fissuramento permitida.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental

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

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

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

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

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Tabela 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
NOTAS					
1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.					
2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.					
3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Tabela 3 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ 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 ≥ 15 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 ≥ 45 mm.					

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Classes de Agressividade Ambiental:

- Classe de agressividade ambiental I: São os ambientes sem as agressões químicas decorrentes da poluição urbana ou chuva ácida. É a classe caracterizada pelos edifícios em ambientes rurais

Como pode-se notar nas tabelas acima, a norma permite uma relação água cimento maior e a classe do concreto com Resistência Característica do Concreto à Compressão menor. Além disso, é possível utilizar uma camada mais fina de concreto sobre as armaduras.

- Classe de agressividade ambiental II: São os ambientes que sofrem agressões ambientais como as provenientes do dióxido de carbono e dos cloretos presentes na atmosfera. Nos ambientes dessa classe a falta de umidade constante reduz o risco de deterioração da edificação. É a classe caracterizada pelos edifícios em ambientes residenciais e comerciais.
- Classe de agressividade ambiental III: Nesses ambientes encontra-se um teor de umidade mais elevado e agentes agressivos estão mais concentrados. É a classe caracterizada pelos edifícios localizados em cidades costeiras ou arredores de algumas indústrias.

Como pode-se notar nas tabelas acima, a norma permite uma relação água cimento maior e a classe do concreto com Resistência Característica do Concreto à Compressão menor. Pode-se notar na tabela (2) que o aumento da espessura do revestimento é mais significativo.

- Classe de agressividade ambiental IV: São ambientes muito agressivos, principalmente para o aço. Tem um teor de umidade elevado e alta concentração de agentes corrosivos.

É a classe caracterizada pelos locais onde o edifício está em contato direto com a água do mar ou dentro de indústrias.

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) determina que as edificações que se encontram nos locais com essas características devem ter a menor relação água cimento, o maior revestimento da armadura e o concreto com a melhor Resistência Característica do Concreto à Compressão.

3.4 PREVENÇÃO

As patologias nas estruturas de concreto armado é um dos problemas mais frequente na construção civil e não é difícil encontrar algum tipo de falha durante a vida útil da estrutura. Porém, é sempre bom tentar evitar esses erros para que as manutenções não custem mais caro do que deveria.

Isto não é diferente quando se fala da carbonatação do concreto, existem alguns cuidados que podem ser tomados para reduzir ou até eliminar a ocorrência dessa patologia. São eles a concepção do projeto estrutural, a dosagem do concreto e o uso do de uma adição e a manutenção preventiva.

3.4.1 A concepção do projeto estrutural

O principal fator relacionado à concepção do projeto estrutural que têm influência nos efeitos da carbonatação é o cobrimento. Quanto maior for o cobrimento da armadura, mais difícil de o gás carbônico alcançar a camada protetora entre o concreto e o aço e conseqüentemente, a corrosão é evitada.

É indispensável seguir à risca os valores dos cobrimentos mínimos estabelecidos na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), de acordo com a classe de agressividade do local onde será localizado a estrutura. conforme apresentado nas figuras 1.

Pauletti (2009) e Ferreira (2013), ressaltam que além de garantir a espessura, é importante que o concreto que será utilizado para executar cobrimento seja com materiais de alta qualidade.

Um outro fator, relacionado à concepção do projeto que deve receber uma grande atenção para reduzir não só a ocorrência do processo de carbonatação, mas para garantir a segurança da estrutura como um todo, são as sobrecargas da estrutura, pois aumentem o risco de aparição de trincas, fissuras e rachaduras. E de acordo com Carmo (2009), as fissuras facilitam a entrada de CO₂ ou outros gases e dessa forma o fenômeno de carbonatação é acelerado.

3.4.2 Dosagem do concreto

A dosagem do concreto tem um papel fundamental na velocidade com que a carbonatação vai ocorrer.

Como as reações de carbonatação dependem da presença de água e de oxigênio, o processo tende a ser acelerado quando os poros são parcialmente ocupados por ar e por água. Isso pode ser amenizado diminuindo os poros no concreto para reduzir a penetração do ar, adotando uma menor relação água ou fazendo-se o uso de uma adição tal como sílica ativa.

3.4.3 Execução da estrutura

Algumas vezes, o projeto estrutural pode ser elaborado, respeitando os valores mínimos da norma em relação ao cobrimento, mas no canteiro de obra o projeto não é bem executado.

Para garantir uma boa execução do cobrimento, conforme está definido no projeto estrutural, é preciso utilizar os espaçadores dentro do canteiro de obra. Eles ajudam a manter as armaduras posicionadas no centro da forma e assim garantir o correto cobrimento do concreto.

Os mais utilizados são os de plástico, por já estarem prontos para o uso direto na obra. Além disso, eles apresentam um custo menor.

Mas caso aconteça uma situação específica onde é preciso utilizar um espaçador personalizado, espaçador feito em obra é o mais adequado nesse tipo de situação.

3.4.4 Adições

Em busca de melhorar as propriedades físicas e mecânicas do concreto, tornou-se frequente o uso de adições na mistura do concreto. Elas são utilizadas principalmente para diminuir o volume de vazios, reduzir a permeabilidade e melhorar a resistência mecânica.

Mas por outro lado, deve-se tomar alguns cuidados como por exemplo, compatibilidade com outros componentes do concreto, pois eles podem causar um efeito não desejado.

Isso não é diferente com a carbonatação, o uso de algumas adições pode ajudar a reduzir a velocidade de carbonatação e outros podem ter um efeito contrário.

De acordo com Raisdorfer (2015) o uso da a maior parte das adições apresentaram um aumento no coeficiente de carbonatação do concreto. Apenas 2 adições apresentaram uma redução na velocidade do fenômeno, são elas; o metacaulim, seu uso reduziu em 8% o KCO_2 e a sílica ativa reduziu em 69 %o KCO_2 em 69%.

Tasca (2012) afirma que a presença da pozolanas no concreto causa reações pozolânicas e isso diminui os teores de hidróxido de cálcio e, conseqüentemente, ocorre um aumento da velocidade de carbonatação, visto que a difusão do CO_2 nos poros é inversamente proporcional à quantidade de hidróxido de cálcio disponível para reagir.

Além disso, Vagheti (1999) apoia essa tese, afirmando que quanto maior a presença da pozolana no traço do concreto, maior é a velocidade de carbonatação, pois ocorre uma diminuição nos teores de CH na solução dos poros do concreto e isso torna mais rápida a difusão de CO_2 nos poros.

3.4.5 A manutenção preventiva

Segundo Villanueva (2015), a falta da manutenção adequada e recorrente em edificações é um dos principais responsáveis por patologias das mais variadas e que podem causar vários danos, tanto materiais como pessoais.

Para que uma estrutura de concreto armado apresenta uma boa durabilidade durante sua vida útil, muitas vezes não é apenas suficiente que ela seja projetada e executada da forma correta, mas ela precisa receber manutenção adequada, **Lira e Brito (2016)**.

Podemos dividir as manutenções em 2 grandes grupos estratégica (preventivas e corretivas) e esporádica (corretivas e emergencial)

Nessa parte do trabalho, falaremos apenas da manutenção estratégica e preventiva e nos próximos tópicos será abordado outros tipos de manutenção.

De acordo com **Nakamura e Farias (2013)**, a observação e a manutenção preventiva são as melhores formas de garantir a durabilidade de uma estrutura de concreto. Elas consistem em realizar as revisões frequentes nas estruturas em um período determinado, para evitar falhas na estrutura e aumentar as chances de a estrutura permanecer com boa qualidade.

Para a carbonatação do concreto, as manutenções preventivas podem ajudar a identificar se a presença de cloreto no concreto ou determinar a profundidade da carbonatação. A identificação de um elemento de concreto sob efeito de carbonatação, pode ser feito por análises visuais e técnicas eletroquímicas como comentado nos **tópicos 3.1 e 3.2**.

Helene (1992) afirma que quanto mais avançadas as manifestações patológicas, mais altos são os custos para sua recuperação.

Dessa forma, pode-se dizer que as manutenções preventivas podem ajudar a reduzir os altos custos gerados com recuperações, pois elas permitem identificar as patologias nas fases iniciais quando elas são feitas em períodos adequados.

3.5 REPARO, REFORÇO E RECUPERAÇÃO

Ao avaliar uma estrutura, uma vez detectada a presença de carbonatação, deve-se buscar a solução ideal para essa solução, dependendo da profundidade da carbonatação e da complexidade técnicas, operacionais e de manutenção.

Além das manutenções estratégicas preventivas, pode-se identificar a presença da patologia implementando esses 3 tipos de manutenções:

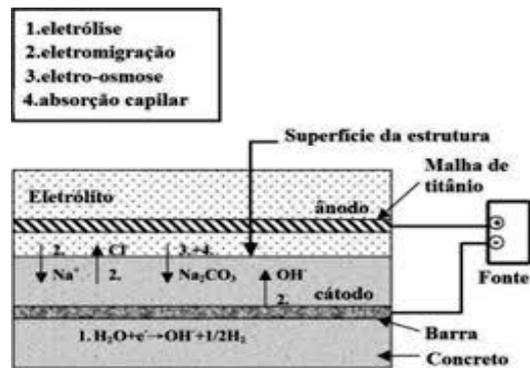
- Manutenção estratégica corretiva: É um tipo de solução que permite a correção de manifestações patológicas evidentes Helene (1992).
- Manutenção esporádica corretiva: Ela apresenta um custo mais elevado de manutenção, pois ela não é planejada.
- Manutenção esporádica emergencial: É utilizada em caso de recuperação de estrutura com o estado de patologia mais avançada, às vezes até quando apresenta uma impossibilidade de uso **Laurenço e Mendes (2011)**.

Quando uma estrutura é considerada carbonatada, mas ainda apresenta condições de uso, ele pode ser recuperado aplicando a técnica de realcalinização do concreto, com o objetivo de elevar o pH do concreto para restabelecer a alcalinidade do mesmo. Ela pode ser realizada por técnicas eletroquímicas ou químicas.

- Realcalinização eletroquímica: É um tratamento temporário e não destrutivo que consiste em uma malha de aço ou titânio ativado (ânodo) imerso

em um eletrólito, que geralmente é uma polpa de papel imersa em solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) ou carbonato de potássio (K_2CO_3) (BERTOLINI; CARSANA; REDAELLI, 2008) (Figura 9).

Figura 9 – Processo de realcalinização eletroquímica



Fonte: Yeih e Chang (2005).

Na Figura 10 podemos observar a aplicação de realcalinização eletroquímica em estrutura real.

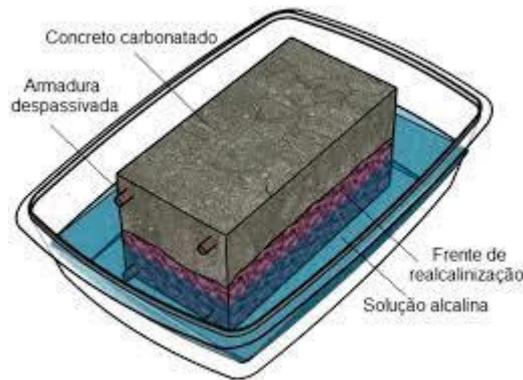
Figura 10 – Aplicação de realcalinização eletroquímica em estrutura real



Fonte: Bertolini, Carsana e Redaelli (2008).

- Realcalinização química: Não é preciso criar um de campo elétrico na sua aplicação, ela consiste na reação dos íons alcalinos com a fase líquida dos poros do concreto, aumentando assim seu pH (ARAÚJO, 2009) (Figura 11).

Figura 11 – Esquema de realcalinização química



Fonte: Adaptado de Araujo (2009).

Além disso, existem algumas técnicas tradicionais, como por exemplo a de usar um revestimento para recuperar a armadura já corroída. Essas técnicas, além de serem mais trabalhosas, muitas vezes exige que se remova parte do concreto na região afetada.

Segundo Souza (1998), as etapas de recuperação são: Delimitação, remoção, limpeza, preparação, revestimento, recomposição, proteção.

- Delimitação: Nessa etapa, faz-se apenas um corte da área a ser separada. Deve-se tomar cuidado para que o corte não comprometa a estrutura Souza (1998) (Figura 12).

Figura 12 – Área carbonatada e não carbonatada



Fonte: Spotcursos.

- Remoção: Remova-se o concreto que está degradado ao redor do aço, principalmente no cobrimento (HELENE, 1992) (Figura 13).

Figura 13 – Remoção do concreto desagregado



Fonte: Tratamento do concreto.

- Limpeza: Nessa fase acontece a remoção de resíduos tais como: ferrugens, graxas, carbonatos, para preparar o substrato para a recepção do material do reparo. Ela pode ser por ação mecânica, ação química, solubilização e detergentes (Figura 14).

O mais usado é a limpeza mecânica, que consiste na escovação com cerdas e no lixamento com lixa manual ou elétrica para eliminar os elementos da corrosão na superfície do aço (HELENE, 1992).

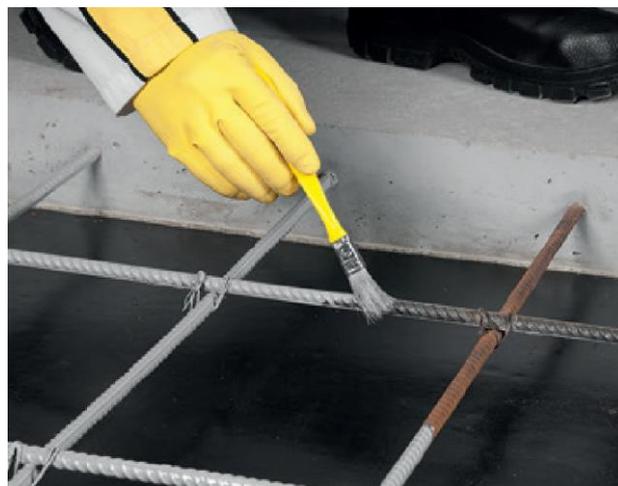
Figura 14 – Limpeza do substrato e remoção de resíduos



Fonte: Tratamento do concreto.

- Preparação: É preparado a superfície para receber os tratamentos.
- Revestimento: Se necessário, se faz tratamento superficial nas armaduras aplicando pintura líquida ou em pó para protegê-los. As mais indicadas são as epoxídicas (HELENE, 1992) (Figura 15).

Figura 15 – Tratamento superficial da armadura



Fonte: Quartzolit.

- **Recomposição:** Nessa etapa é aplicada o concreto e a argamassa para recompor a superfície da estrutura. Esse processo não é feito com objetivo de aumentar a resistência à compressão, ele tem apenas a função de recompor a estrutura (Figura 16).

Figura 16 – Recomposição superficial do concreto



Fonte: Estacechen e Cormin (2017).

- **Proteção:** Esse processo é muito importante para reduzir a velocidade com que os agentes agressivos vão penetrar na estrutura (CÁNOVAS, 1988). Pode-se utilizar as tintas orgânicas, concreto de elevada densidade, argamassa polimérica de cimento Portland ou materiais cerâmicos (Figura 17).

Figura 17 – Argamassa polimerica



Fonte: Normatel.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme visto neste trabalho, a carbonatação do concreto é uma patologia muito frequente em estruturas de concreto armado e ela pode ocasionar certos danos na armadura e depois na estrutura como um todo. Por isso, é muito importante que tanto o engenheiro projetista, como o engenheiro construtor tomem todos os devidos cuidados para evitar a ocorrência desse fenômeno.

Em relação a prevenção, deve-se respeitar tanto no projeto como na execução, os valores mínimos dos cobrimentos estabelecidos na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) de acordo com a classe de agressividade. Além disso, é de grande importância usar um concreto com menor volume de vazios possível, reduzindo a relação água/cimento ou usar uma adição na mistura do concreto.

Vale ressaltar que, às vezes a estrutura pode ter sido bem projetada e bem executado, mas ao longo do seu uso ela pode estar sujeita a algumas situações que não foram previstas no projeto. Dessa forma, é necessário realizar manutenções preventivas em um período determinado para avaliar o estado em que se encontra a estrutura. Uma vez detectado início de ocorrência de carbonatação, deve-se começar o processo de reparo ou recuperação da estrutura dependendo dos danos já causados, para que a situação não piore.

Por ter o melhor custo/benefício, é mais frequente usar a fenolftaleína para determinar a profundidade da carbonatação, visto que os outros métodos de medições apresentam um custo mais elevado e maior dificuldade de execução.

O concreto carbonatado acelera a corrosão da armadura no caso do concreto armado, pelos estudos realizados, existem algumas soluções que podem ser executadas para reduzir os danos, são elas: realcalinização do concreto, com o objetivo de elevar o pH do concreto ou uso de revestimento para recuperar a armadura já corroída.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Ana Paula Barbosa. **Análise da vida útil residual de elementos de concreto armado em edificações urbanas** – Estudo de Caso. 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Rubber Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA)**. Philadelphia: ASTM, 1995.
- ANDRADE, Humberto Dias. **Carbonatação em Concreto de Escória de Aciaria**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- ARAUJO, F. W. C. Estudo da repassivação da armadura em concretos carbonatados através da técnica de realcalinização química. Tese (Tese de doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009
- ARIVABENE, Antonio Cesar. Patologias em Estruturas de Concreto Armado - Estudo de Caso. **Revista On-Line IPOG**, [s. l.], v. 1, n. 10, p. 1–22, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- AZEVEDO, M. T. D. Patologia das Estruturas de Concreto. Concreto: Ciências e Tecnologia, p. 1095-1128, 2011
- BAZZAN, Giselle Christine da Graça. **Análise do cobrimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo**. 2014. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- BERTOLINI, Luca; CARSANA, Maddalena; REDAELLI, Elena. Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation. **Journal of Cultural Heritage**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 376–385, 2008.
- BOLDO, Plínio. **Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- BRAUN, V. **Influência das condições de moldagem e cura nas características do cobrimento de diversos concretos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CALAZANS, Ruan. **Carbonatação do Concreto**: Notas de aula. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011. Disponível em: <https://www.doccity.com/pt/carbonatacao-do-concreto/4758834/>. Acesso em: 29 jan. 2023.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1988.

CARMO, Marco Antônio do. **Estudo da deterioração de Marquises de Concreto Armado nas cidades de Uberlândia e Bambuí**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, 2009.

CASTELLOTE, Marta *et al.* Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 515–525, 2009.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Model Code 2010** - First complete draft. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2010.

COSTA, Leila Ribeiro. **Os impactos do mau gerenciamento do escopo numa obra de engenharia**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Gerência de Projetos) - Fundação Getúlio Vargas, Salvador, 2018.

COUTO, Rafael Aredes. **Avaliação Probabilística da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à carbonatação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

DELLING, Breno Pimenta; CUANI, Daniel Mariano. **Verificação da influência da carbonatação do concreto na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Patologia das Obras Civas) - Faculdade IDD, São Paulo, 2018.

ELTRA. **Análise Termogravimétrica (ATG)** - Determinação de umidade em substâncias secas, de componentes voláteis e de cinzas. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.eltra.com/pt/applications/knowledge-base/thermogravimetric-analysis/>. Acesso em: 29 jan. 2023.

ESTACECHEN, Tatiana Alves Cecílio; CORMIN, Kevin Willian. Causas e alternativas de reparo da corrosão em armaduras para concreto armado. **Revista Construindo**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 36–47, 2017.

FARIAS, Roberto F. dos S.; TEZUKA, Yazuko. **Corrosão das armaduras de concreto**: mecanismos e controle. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERREIRA, A.; FRÉZ, J. C.; MEDEIROS, M. H. F. Reposição da Reserva Alcalina de concreto com adição pozolânica usando cal hidratada: um estudo sobre

carbonatação acelerada. *In*: Congresso Brasileiro do Concreto, 55., 2013, Gramado. **Anais** [...]. Gramado: Instituto Brasileiro do Concreto, 2013.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GOMES, Nivaldo de Almeida. **Estruturas de Concreto Armado Interrompidas em Ambiente Urbano: Avaliação da Carbonatação à Luz das Recomendações da NBR 6118:2003**. 2006. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI,

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Manual para reparo, reforço e proteção das estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992.

INTERJET ARTIGOS PARA LABORATÓRIOS. **Solução Fenolftaleína 1% Alcoolica (Ph 8,2 - 10,0)**. São Paulo, 2023. Disponível em: <http://www.interjet.com.br/produto/solucao-fenolftaleina-1-alcoolica-ph-82-100>. Acesso em: 29 jan. 2023.

KULAKOWSKI, Marlova Piva. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LABCONTROL. **Analisador Termogravimétrico MACRO TGA-2000**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://labcontrol.com.br/category/navas-instruments/>. Acesso em: 29 jan. 2023.

MARTINS, Carlos Alberto Cavalcanti. **Estimativa da profundidade de carbonatação do concreto com o uso de redes neurais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

PAULETTI, Cristiane. **Estimativa de carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

POSSAN, Edna. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

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

RAISDORFER, Janderson William. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RAJISHA, K.R.; POTHAN, L.A.; THOMAS, S. **Thermomechanical and spectroscopic characterization of natural fibre composites**. Interface Engineering of Natural Fibre Composites for Maximum Performance, p.241-274, 2011.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

RIBEIRO, Daniel Vêras *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RIBEIRO, Philippe Hypólito Lins Cabral. **Realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano - influência de características da estrutura no comportamento do tratamento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

RODRIGUES, Thiago Ramalho. **Impactos da aplicação de ferramentas de ferramentas de gerenciamento no desempenho de obras**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SALDANHA, Filipe José Martins. **Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio de carbonatação acelerada com controle de umidade relativa**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.

SILVA, Dayane Vieira. **A Importância da Implementação do gerenciamento de projetos na construção civil**. 2018. Trabalhos de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhaçu, Manhaçu, 2018.

SILVA, Luiza Kilvia da. **Levantamento de manifestações patológicas em estrutura de concreto armado no estado do Ceará**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SILVA, Marcos André Oliveira; CORRÊA, Leonardo Rodriguês; RUAS, Adriana Xavier Alberico. Gerenciamento de projetos na construção civil: Tempo, custo e qualidade. **Revista Construindo**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 1–20, 2018.

SOUZA, Vicente Custódio de; RIPPER, Thomaz. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. 1ª ed. São Paulo, Pini, 1998

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

VAGHETTI, Marcos Alberto Oss. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

VAGHETTI, Marcos Alberto Oss. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VENUAT, M.; ALEXANDRE, J. De la carbonatation du béton. França. CERILH. Publication N° 195, 1969

VERBECK, G. Carbonatation of Hydrated Portland Cement. American Society Testing Material. Special Technical Publication, 1958

VIEIRA, Matheus Assis. Patologias Construtivas: Conceito, Origens e Método de Tratamento. **Revista On-Line IPOG**, [s. l.], v. 1, n. 12, p. 1–15, 2016.

WERLE, Ana Paula; KAZMIERCZAK, Claudio de Souza; KULAKOWSKI, Marlova Piva. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 213–228, 2011.

YEIH, Weichung; CHANG, Jiang Jhy. A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 516–524, 2005.