UNICESUMAR - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS TECNOLÓGICAS E AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

INVESTIGAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUSCETÍVEIS À DETERIORAÇÃO POR CARBONATAÇÃO EM TRÊS AMBIENTES DISTINTOS – ESTUDO DE CASO

RAULENE WANZELER MACIEL

CURITIBA– PR
2021

Raulene Wanzeler Maciel

INVESTIGAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUSCETÍVEIS À DETERIORAÇÃO POR CARBONATAÇÃO EM TRÊS AMBIENTES DISTINTOS – ESTUDO DE CASO

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. MSc Tiago Radaskievicz.

CURITIBA – PR

2021

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAULENE WANZELER MACIEL

INVESTIGAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUSCETÍVEIS À DETERIORAÇÃO POR CARBONATAÇÃO EM TRÊS AMBIENTES DISTINTOS – ESTUDO DE CASO

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. MSc Tiago Radaskievicz.

Aprovado em: ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

_____

Nome do professor – (Titulação, nome e Instituição)

_____

Nome do professor - (Titulação, nome e Instituição)

_____

Nome do professor - (Titulação, nome e Instituição)

INVESTIGAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUSCETÍVEIS À DETERIORAÇÃO POR CARBONATAÇÃO EM TRÊS AMBIENTES DISTINTOS – ESTUDO DE CASO

Raulene Wanzeler Maciel

RESUMO

O presente trabalho propõe um estudo de investigação em estruturas de concreto armado sujeitas à carbonatação. As edificações em estudo encontram-se localizadas em três ambientes distintos, ou seja, em classes de agressividade ambiental diferentes, o que permite correlacionar como as condições de exposição ambiental de cada estrutura, influenciam o desencadeamento de patologias no concreto. Foram selecionadas edificações localizadas em cidades do estado do Paraná, com tempo de ocupação/uso maior ou igual a 5 (cinco) anos, a partir da data do "habite-se". As edificações selecionadas foram submetidas ao ensaio de carbonatação com aspersão de solução de fenolftaleína, conforme as determinações da normativa EN 14630:2007. A partir do relatório fornecido pelo SIMEPAR, das estações meteorológicas de cada cidade, onde o estudo se realizou, pode-se quantificar as variáveis ambientais que influenciam diretamente na velocidade de carbonatação (umidade relativa do ar, concentração de gás carbônico na atmosfera e temperatura) no intervalo de tempo considerado (2016 a 2020). A partir do estudo, pode-se mostrar a eficácia de um método de inspeção simplificado ao identificar se o cobrimento das estruturas de concreto armado estão carbonatados e quanto desse cobrimento, deverá ser recuperado, afim de impedir o processo de corrosão das armaduras; pode-se ainda, constatar que estruturas inseridas em ambientes agressivos, estão mais propensas à carbonatação, onde a qualidade do concreto deverá ser determinante para retardar o avanço, bem como o auxílio com o uso de tintas orgânicas para sua proteção.

Palavras-chave: Corrosão. Despassivação. Ph do Concreto.

RESEARCH ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUSCEPTIBLE TO CARBONATION DETERIORATION IN THREE DIFFERENT ENVIRONMENTS - CASE STUDY

ABSTRACT

The presented paper proposes a study of investigation on structures of armed concrete susceptible to carbonation. The edifications under study are located on three different environments, that is, in different classes of environmental aggressiveness which allows correlating how the environment exposure conditions of each structure influence the triggering of pathologies in concrete.

Buildings located in cities in the State of Paraná with occupation/use time greater than or equal to 5 (five) years were selected, from the date of habitation. The selected buildings were

submitted to the carbonation testing with spraying of phenolphthalein solution according to the determinations of EN 14630:2007. According to the report provided by SIMEPAR of the weather stations of each city where the study was carried out, it is possible to quantify the environmental variables that influence directly the carbonation speed (relative humidity, concentration of carbon dioxide in the atmosphere and temperature) in the time interval considered (2016 to 2020).
From the study, the effectiveness of a simplified inspection method can be shown by identifying whether the cover of reinforced concrete structures is carbonated and how much of this cover should be recovered in order to prevent the corrosion process of reinforcement; it can also be seen that structures inserted in aggressive environments are more prone to carbonation where the quality of concrete should be decisive to delay advancement as well as aid with the use of organic paints for its protection.

Keywords: Corrosion. Depassivation. Concrete Ph.

1 INTRODUÇÃO

O concreto e o aço são considerados os materiais estruturais mais comuns e com maior uso na construção civil. Sua aplicabilidade é vasta e eficiente visto que, juntos, as propriedades de ambos se complementam corroborando em um sistema capaz de resistir a esforços mecânicos, possui resistência à efeitos térmicos e intempéries atmosféricas. Os fatores de disponibilidade dos materiais no comércio da construção, a facilidade de aquisição, custo e conhecimento das técnicas de trabalho com o material também influenciam no favoritismo na escolha por este sistema estrutural, além das questões culturais e históricas (CARVALHO E FILHO, 2007).

Embora o concreto seja um material resistente a diversos agentes agressivos, as suas propriedades capazes de resistir a esses agentes não o tornam blindado de sofrer sérios danos, os quais são definidos como patologias do concreto. O grau de agressividade dos agentes, as condições do ambiente em que a estrutura está inserida e o tempo de exposição - fatores imutáveis - norteiam o nível de degradação que a estrutura estará sujeita a sofrer, além da tomada de decisão durante a fase de projeto e na execução, que são fatores considerados controláveis.

O desencadeamento de patologias nas estruturas de concreto tem se tornado frequentes, gerando um alto índice de retrabalhos e alto custo de reparo. Há uma preocupação instaurada no mercado para minimização dos problemas e diminuição nos custos de reparo. Segundo Andrade (apud Almir Sales, et al. 2020), a construção civil começou a sentir os impactos, causados pela deterioração das estruturas a partir do século XX. Em um levantamento realizado para o comitê *Concrete Durability Skalny* (1988) foi relatado o valor total de todas as construções de concreto dos Estados Unidos resultando em montante de aproximadamente US$ 6 trilhões, por outro lado, os custos de reparo puderam ser estimados em US$ 50 bilhões por ano, representando 16% do total do setor.

Dentre as patologias do concreto, a corrosão das armaduras apresenta-se como o fenômeno rotineiro e complexo, pois a estabilidade da estrutura está diretamente ligada com a integridade das armaduras. Há uma preocupação geral em garantir a proteção do aço, o que pode ser evidenciado nos requisitos do projeto, descritos na NBR 6118:2014, ao estabelecer espessuras mínimas de cobrimento das armaduras. O cobrimento do concreto consiste como peça chave na proteção das armaduras e aos agentes externos, a partir da camada passivadora. O mecanismo principal que afeta a estabilidade da camada protetora do aço no concreto, é o

ingresso de CO2 no interior da estrutura que, ao reagir com os componentes químicos do cimento, desencadeia o processo de carbonatação (TUUTI, 1982).

Conforme define Possan (2010), a carbonatação refere-se a um processo de caráter físico-químico que ocorre no interior do concreto, causando a perca da sua alcalinidade. A redução do Ph ocorre gradativamente, de forma que esta redução, afeta a estabilidade da camada protetora da armadura, tornando-a suscetível ao processo de corrosão. A NBR 6118:2014, de forma mais genérica, define o processo de carbonatação como ação do gás carbônico presente na atmosfera sobre as armaduras. Há variadas definições em relação à carbonatação em estruturas de concreto, realizadas por grandes autores como Helene (1986), Visser (2014), entre outros. As definições possuem similaridade em relação a sua narrativa e preocupação primordial, com a reação do CO2 e os hidróxidos do cimento.

Com base no exposto, o presente artigo abordou, através de um estudo de caso, a ocorrência do processo de carbonatação em estruturas de concreto armado, inseridas em ambiente industrial, marinho e urbano. A partir deste trabalho, procurou-se realizar uma relação entre as características do micro-clima em que as edificações estão inseridas, e as recomendações da NBR 6118;2014, em relação ao cobrimento com o avanço da frente de carbonatação no seu interior, abordando as possíveis causas do desencadeamento da patologia e o risco de corrosão das armaduras. A necessidade de inspeção rotineira por métodos simples, como o aqui abordado, poderá propiciar uma intervenção com custo menor e garantir maior tempo de vida útil à estrutura.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

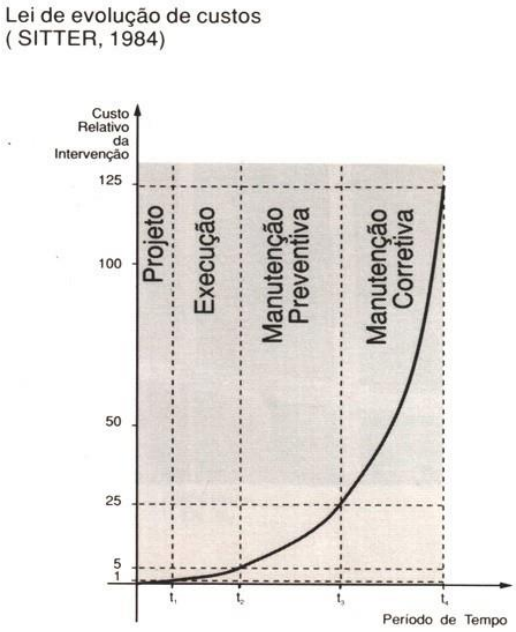
O mercado da construção civil tem expandido áreas específicas que outrora, nem eram cogitadas por profissionais em formação. Hoje, há uma preocupação em buscar um especialista para cada fase de um projeto desde os estudos de viabilidade, até a entrega da obra. Contudo, os recorrentes problemas de patologias que surgem pós-ocupação, têm possibilitado a fase de planejamento das construções até o pós-obra.

O desencadeamento de patologias e o crescimento de áreas relacionadas à reparação, restauração ou manutenção de edificações, não são bem quistos pelo mercado imobiliário, pelas construtoras e pelos usuários das edificações. Além de representarem mal-estar em seus

usuários, para as construtoras e o mercado imobiliário, o desencadeamento de patologias representa gastos relevantes.

A Lei da Evolução de Custos ou Lei de *Sitter* realiza uma abordagem objetiva em relação à evolução dos custos em cada fase do projeto. À medida que um erro não é corrigido na fase prematura, o seu custo de correção excederá como uma progressão geométrica de razão 5 (cinco) na fase subsequente. Pode-se afirmar que as correções serão mais efetivas e menos onerosas, quanto mais cedo forem executadas (HELENE, 1992). A definição da Lei de Sitter pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Evolução dos custos de intervenção no decorrer do tempo conforme a Lei de *Sitter* 1984.



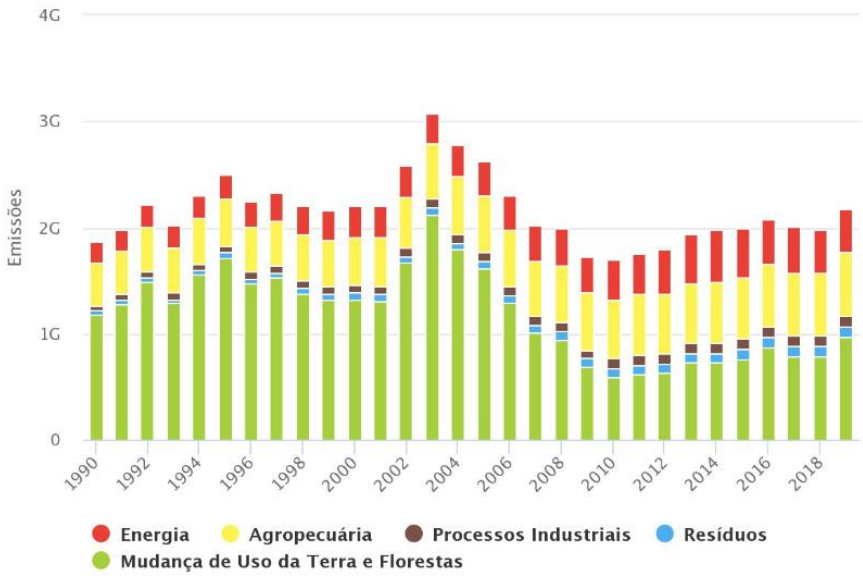
Fonte: Helene, 1992

No ponto de vista ambiental, no que diz respeito à sustentabilidade, há uma preocupação em garantir um desempenho satisfatório às edificações e prolongamento de sua durabilidade, consequentemente, vida útil, visto que, os insumos utilizados para fabricação do cimento são finitos e pouco reaproveitáveis (POSSAN, 2010). Logo, existe uma questão de responsabilidade atrelada ao uso racional dos recursos empregados na construção civil.

Frente ao modo de vida globalizado, as emissões de gás carbônico na atmosfera pela atividade industrial, pela queima de combustíveis fósseis, pelas atividades agropecuárias, pela geração de resíduos, pela diminuição das áreas verdes tendem a se intensificar. Segundo

dados do relatório de 2019 do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de efeito estufa (SEEG), o Brasil emitiu cerca de 2,18 bilhões de toneladas de dióxido de carbono. A figura 2 apresenta um gráfico com as estimativas de emissão pelo país por atividade entre 1990 e 2018.

Figura 2 – Emissão de dióxido de carbono no Brasil.



Fonte: SEEG Brasil, 2020.

Face o exposto, verifica-se a preocupação da comunidade técnico-científica, em relação ao aumento de ocorrências patológicas nas edificações, o alto custo de reparação e a necessidade de aprimoramento de estudos com técnicas eficazes na recuperação das estruturas. Como exemplo recente, a Associação Brasileira de Patologias da Construção (ALCONPAT) realizou uma reunião técnica com a presença do presidente do IBRACON, Paulo Helene, onde foram debatidas causas, reflexões e lições aprendidas a partir de acidentes estruturais no Brasil. Além das catástrofes nacionais, foram retratadas as causas do recente colapso do edifício em Miami, com grandes incidências de corrosão, devido à agressividade do ambiente (região marítima).

2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO

O concreto de cimento *Portland* é um material vastamente utilizado no mundo. Embora haja o acesso a novos meios construtivos que ameacem a sua hegemonia na

construção, o seu futuro ainda é otimista. Seu favoritismo é justificado, pois para a maioria das soluções, oferece propriedades de engenharia adequadas a baixo custo (MEHTA e MONTEIRO, 2001).

As propriedades químicas do cimento *Portland*, em especial sua relação hidrofílica com a água dada sua capacidade de endurecer ao reagirem, permitem que este seja denominado de "cimento hidráulico" (NEVILLE, 2016).

A água está presente em diversas etapas importantes para a durabilidade das estruturas de concreto, sendo primordial para a preparação do cimento, pega, formação dos compostos cristalinos e sua rede de poros. A evolução dessas características poderá definir parâmetros de durabilidade de sua estrutura, por exemplo, se o concreto for muito poroso permitirá facilmente o ingresso de agentes agressivos ao seu interior. Dessa forma, a NBR 6118:2014 no item 7, estabelece critérios que visam aumentar a durabilidade e um dos itens predeterminados é a relação água/cimento da mistura na produção do concreto.

Além da água, há quatro compostos principais que constituem o cimento Portland e são responsáveis pela hidratação, cristalização, resistência e alcalinidade da pasta. Esses compostos estão listados na tabela 1.

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

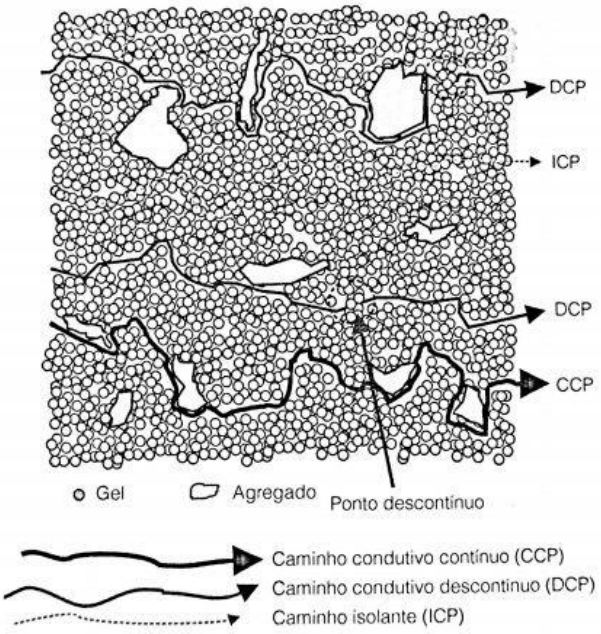
Fonte: Adaptado de NEVILLE, AM. 2016

Os silicatos no cimento não são compostos puros dada à presença de óxidos. Esses óxidos exercem papel significativo no arranjo atômico, na forma dos cristais e em propriedades hidráulicas dos silicatos (NEVILLE, 2016). Além dos compostos principais, existem os compostos secundários. Dois deles são especiais: óxidos de sódio e potássio (Na_2O e K_2O), afetam a velocidade do ganho de resistência do cimento e são responsáveis pela alcalinidade do concreto de cobrimento.

No processo de hidratação do cimento são gerados os produtos de hidratação identificados coletivamente como gel, cristais de cal hidratada ($Ca(OH)_2$), cimento anidro e vazios denominados poros capilares. (NEVILLE, 2016). A quantidade de água utilizada na hidratação definirá parâmetros de qualidade do cimento como a porosidade, basicidade dos álcalis, permeabilidade, difusividade, absorção e resistência. Devido à complexidade das reações entre a água e os componentes do cimento, o processo de hidratação vem sendo estudado constantemente (SALES, et al. 2020).

Dentre as microestruturas formadas no processo de hidratação, é de interesse a formação dos poros capilares. NEVILLE (2016) define os poros capilares como parte do volume que não foi preenchido pelos produtos de hidratação sendo dependente desse processo e da relação água/cimento adotada. O concreto possui um sistema de poros heterogêneos, misturados e conectados entre si com poros maiores preenchidos por ar e poros reduzidos contendo água. Essa rede de poros conectada é a principal responsável pela permeabilidade da pasta de cimento endurecida e no transporte de contaminantes externos para o interior do concreto. (TUTTI, 1982). A figura 3 traz uma representação esquemática do funcionamento e caminho dessa microestrutura.

Figura 3 – Representação da microestrutura do concreto



Fonte: SALES et al. 2020

Os mecanismos de transportes dos agentes externos para o interior do concreto, através da microestrutura, ocorrem devido à diferença de pressão, umidade e concentração.

Dependendo de qual fenômeno for preponderante ao ambiente, este poderá ser denominado permeabilidade, absorção capilar, migração iônica ou difusão (SALES et al. 2020).

Para o presente artigo é relevante o processo de difusão, pois é considerado como o mecanismo de transporte predominante de CO_2 para o interior do concreto (HELENE, 1993 apud POSSAN, 2010). A difusão é um processo espontâneo de transporte de substâncias de um meio para outro, devido a uma diferença de concentração química, onde a substância que está em maior concentração em um meio, difunde para o segundo meio com o objetivo de atingir o equilíbrio. Os dois principais agentes agressivos que degradam as armaduras do concreto são os íons cloro e dióxido de carbono (CO_2) (SALES et al 2020).

2.3 CARBONATAÇÃO

A carbonatação é um tipo de reação química entre dois compostos e pode ser representada em uma equação balanceada. Segundo a Teoria Ácido Base de *Arrhenius*, um ácido é caracterizado por ionizar, em meio aquoso, liberando H^+ (hidrogênio) e uma base dissociar, liberando OH^-. Com base nesta definição e observando as equações químicas do processo de carbonatação, este poderia ser definido como um tipo de reação ácido base formando um sal e água. Contudo, antes de resultar na equação principal da reação, há etapas envolvendo outros compostos. As etapas envolvidas no processo de carbonatação podem ser visualizadas no quadro 1.

Quadro 1 – Etapas das reações químicas de carbonatação

ETAPA	PROCESSO	EQUAÇÃO
1ª Etapa	CO2(g) difunde para o interior do concreto.	$CO_2(g) \rightarrow CO_2(aq) + H_2O \leftrightarrow HCO_3 + H \rightarrow CO_3 + 2H$
2ª Etapa	Nos poros do concreto, o CO3 reage com o Ca formando o carbonato de cálcio.	$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca + 2OH$ $Ca + CO_3 \rightarrow CaCO_3$
3ª Etapa	Reação com silicatos e aluminatos.	$2Si_2 \cdot 3CaO \cdot 3H_2O + 3CO_2 \rightarrow 2Si_2 + CaCO_3 + 3H_2O$
4ª Etapa	Final do processo, produção de carbonato de cálcio e água.	$Ca(OH)_2 + CO_2(Aq) \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

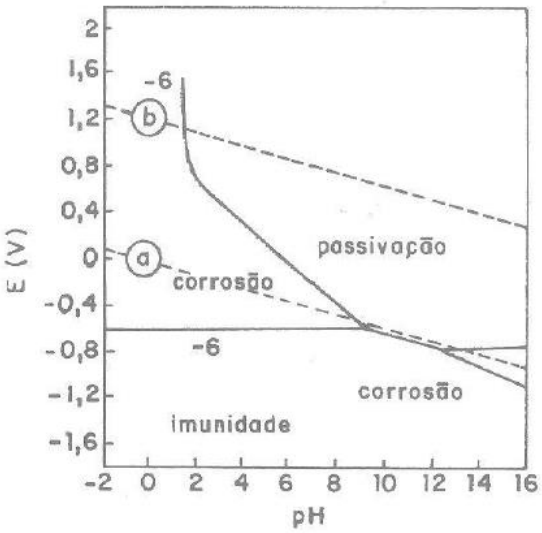
Fonte: adaptado de SALES et al, 2020.

A camada de concreto, ou cobrimento das armaduras, possui um caráter químico alcalino proveniente dos produtos alcalinos de hidratação (tabela 1) e do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Esses compostos, oriundos do processo de hidratação do cimento, possuem caráter básico (Ph entre 13 e 14) tal condição permite que o aço seja passivado (TUUTI, 1982).

Essa camada básica do concreto de cobrimento pode ser alterada quimicamente pela exposição da estrutura ao gás carbônico. O CO_2 penetra nos poros do concreto por difusão, é dissolvido pela umidade presente nas microestruturas dos poros e forma um ácido que reage com os componentes da pasta de cimento, formando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). O produto dessa reação não é responsável pela deterioração da pasta, contudo sua reação consome os álcalis do cimento, consequentemente, reduzindo o Ph do concreto (SALES et al, 2020). O Ph de precipitação do $CaCO_3$ é aproximadamente 9,4 e nessas condições, a estabilidade química da capa passivadora do aço é desfeita (HELENE,1986).

O estado descrito como "passivação" supõe que o metal é recoberto por uma película de óxidos, transparente, que exerce a função de blindar o fenômeno de corrosão no metal (PERDRIX, 1992). Os diagramas de *Porbaix* estabelecem as zonas de Ph, nas quais o metal estará em processo de corrosão, passivado ou se permanece imune. A figura 4 apresenta o diagrama de *Porbaix*, com a ilustração das zonas de Ph e sua influência na integridade dos metais.

Figura 4 – Diagrama de *Porbaix* simplificado para o Fe a 25ºC.



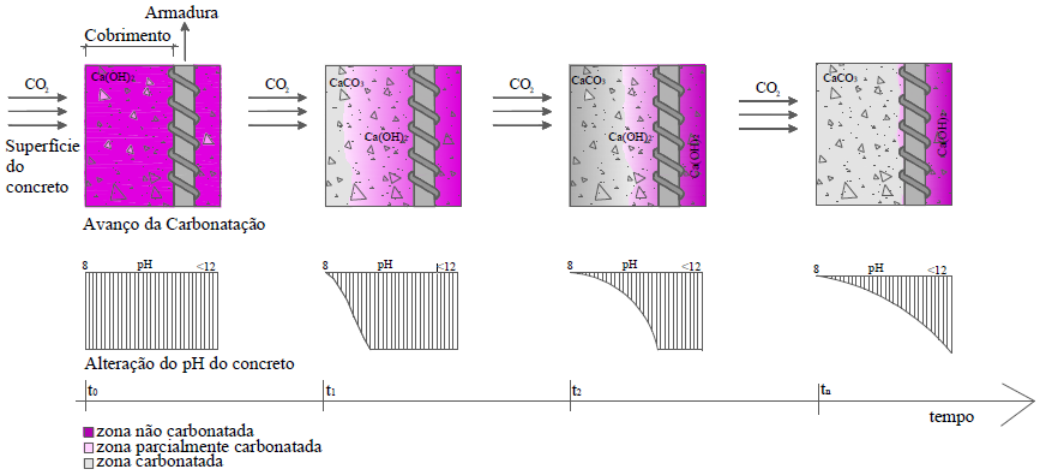
Fonte: Porbaix apud Perdrix, 1992.

O processo de carbonatação é caracterizado pelo avanço da "frente" de carbonatação no interior do concreto. Possan (2010) define o avanço do processo de carbonatação em três zonas distintas: uma carbonatada; uma parcialmente carbonata e uma não carbonatada, com Ph de 8,3, 10 e >12,5, respectivamente.

O processo inicia-se na superfície da estrutura de concreto e avança em seu interior até atingir a armadura, dando início ao processo de corrosão. A visualização deste fenômeno é

possível a partir de um indicador apropriado, que poderá ser o tornassol, fenolftaleína e alaranjado de metila (BIGATÃO, 2016). A figura 5 retrata o avanço da frente de carbonatação no decorrer do tempo.

Figura 5 – Avanço da frente de carbonatação no decorrer do tempo.



Fonte: Possan, 2010.

As condições ambientais, a qualidade do concreto, a disponibilidade de hidróxido de cálcio para a reação são fatores que condicionam a ocorrência da carbonatação e controlam a sua velocidade. No entanto, a reação tende a se estabilizar com a precipitação do $CaCO_3$, que possui baixa solubilidade, causando obstrução dos poros do concreto (POSSAN, 2010). Embora sua velocidade seja controlada por diversos fatores, o avanço da frente de carbonatação é lento e pode ser descrita como uma grandeza inversamente proporcional à espessura de concreto a ser percorrida (SALLES et al, 2020).

2.3.2 Fatores que influenciam no processo de carbonatação

Possan (2010), em seus estudos, realizou a segmentação dos fatores influentes no processo de carbonatação em 3 (três) grupos: características do concreto, condições de exposição e condições ambientais.

2.3.2.1 Características do concreto

Os fatores envolvidos dentro desse quesito são consumo e tipo de cimento, presença de adições minerais, relação água/cimento, cura e presença de fissuras.

O avanço da frente de carbonatação está associado à quantidade de reserva alcalina, disponível na pasta de cimento hidratada. Tal propriedade está atrelada a sua composição química (SALES et al, 2020).

Miranda et al (2018), em seus estudos, observaram que a profundidade de carbonatação aumenta com o uso de adição de fíler calcário, em substituição ao cimento *Portland*. As adições minerais, em especial a pozolânica, afeta a estrutura do cimento de forma física e química. As ações físicas estão associadas ao ganho de resistência à fissuração de origem térmica, refinamento de poros e melhorias na faixa de transição. Já as ações químicas estão relacionadas à diminuição das reservas alcalinas, sendo necessária uma menor concentração de CO_2 para consumir o $Ca(OH)_2$, presente no concreto (NEVILLE, 2016).

A relação água/cimento está diretamente relacionada à permeabilidade e porosidade do concreto, podendo ou não permitir o ingresso ou transporte dos agentes agressivos ao seu interior, pois a definição dessa relação resultará na formação da rede de poros do concreto. As variações na relação água/cimento são a principal fonte de evolução da estrutura de poros heterogêneos, na microestrutura do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2005). A profundidade de carbonatação tende a aumentar em concretos, com relação água/cimento elevada.

A eficiência do processo de cura influenciará diretamente a porosidade do concreto e na ocorrência de fissuração. O tempo de cura e a eficiência do método utilizado definirão o quão hidratado o cimento será, quanto mais hidratado menor a formação de poros heterogêneos, e menor a possibilidade de fissuração do concreto (SALES et al., 2020).

2.3.2.2 Condições de exposição

As condições de exposição se referem às condições em que os elementos estruturais se encontram locados e se estes estão situados em ambiente interno, externo, protegido ou desprotegido de chuva (POSSAN, 2010).

2.3.2.3 Condições ambientais

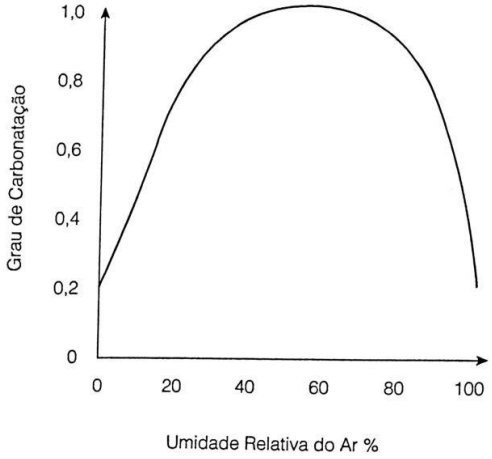
Os principais agentes externos que influenciam diretamente a velocidade de carbonatação são a concentração de CO_2 na atmosfera, umidade relativa do ar e temperatura.

A presença de CO_2 no interior do concreto é fundamental para o consumo da cal hidratada, formando o carbonato de cálcio. Há um aumento na profundidade de carbonatação,

à medida que a concentração de gás carbônico aumenta no ambiente (VISSER apud SALES et al., 2020).

A umidade relativa do ar é um dos fatores preponderantes para a ocorrência das reações de carbonatação, visto que a umidade é responsável pelo grau de saturação dos poros (SALES et al., 2020). Para que as reações de carbonatação ocorram é necessário que os poros estejam parcialmente saturados. Nessa condição, o CO_2, difundido para o interior do concreto, poderá ser dissolvido e reagir com o hidróxido de cálcio. O teor de umidade crítico para que a carbonatação ocorra, está compreendido entre 50% e 65%. A figura 6 mostra o grau de carbonatação com a variação da umidade relativa do ar.

Figura 6 – Grau de carbonatação x umidade relativa do ar.



Fonte: SALES et al, 2020.

Os efeitos da temperatura são considerados na velocidade de carbonatação do concreto, contudo são pouco significativos em temperaturas ambientais, entre 20º C e 40º C (PADAKIS, VAYENAS E FARDIS apud POSSAN, 2010). Para temperaturas muito elevadas, a velocidade de carbonatação aumenta, já em condições ambientais, são associados à umidade no que diz respeito à existência de vapor, ou na saturação dos poros capilares (SALES et al, 2020).

2.4 FATORES INDIRETOS QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

A degradação das estruturas de concreto apresenta-se como um grande problema, devido à variação de deterioração dos seus componentes e sistemas. Possan (2010), em suas pesquisas, relata as dificuldades da comunidade técnico científica em precisar as propriedades dos materiais, os mecanismos de deterioração, a resposta estrutural, a carga ambiental e as condições de uso, manutenção e operação.

Logo, há uma preocupação com qualidade das novas estruturas e com a manutenção das existentes, o que é evidenciado, com a elaboração de normas técnicas recentes, como a norma de inspeção predial NBR 16747 (ABNT, 2020) e eventos técnico-científicos, promovidos pelo IBRACON (Instituto Brasileiro de Concreto).

Considera-se como fator indireto a complexidade do processo de degradação das estruturas de concreto, generalidade e prescrição das normas utilizadas, como referência para projetos estruturais, falta de definição de critérios relacionados ao controle de qualidade na execução e critérios subjetivos de avaliação de desempenho.

Embora haja essa preocupação com a durabilidade, muitos engenheiros usam indicadores prescritivos para projetos estruturais (como cobrimento, resistência à compressão do concreto, entre outros). Entretanto, a norma de referência utilizada para projetos de estruturas de concretos, não informa como um elemento deve ser projetado para atingir determinado período de vida útil. (POSSAN, 2010).

No que se refere ao controle de qualidade, a NBR 6118:2014 no item 7.4.7.4 permite que seja realizada a redução do cobrimento nominal em 5 mm, caso seja realizado um controle de qualidade da produção, rigoroso e explicitado nos desenhos do projeto. Contudo, a norma não define quais métodos de qualidade da produção devem ser adotados, deixando a critério do projetista, essa determinação.

No que diz respeito às considerações previstas na NBR 15575:2013, visando a durabilidade, a norma estabelece que deve ser considerado ainda, na fase de projeto, a vida útil da edificação e dos elementos que fazem parte de sua composição. No entanto, a própria norma enfatiza a dificuldade de se projetar para vida útil, prevista para estruturas de concreto (vida útil de projeto de 50 anos), face aos diversos processos de degradação que a afetam (POSSAN, 2010).

Sales et al (2020) vai adiante nas análises da norma de desempenho, citando que, a avaliação para atingir os valores prescritivos pela norma para VUP, são definidos mediante a análises na fase de projeto em conjunto com a realização de ensaios, ou aplicação de modelos. Contudo, essas definições possuem critérios subjetivos de avaliação e tampouco, claros para os níveis de abordagem descritos.

Vale ressaltar que ao comparar os parâmetros de prescrições para estruturas de concreto da normativa brasileira com os parâmetros das normativas internacionais, como a europeia, BS EN 206 (BRITISH STANDARDS INSTITUCION, 2016**)** e norte-americana, ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2014), verifica-se a generalidade dos requisitos aplicados e pouca abrangência em relação aos cenários de exposição ambiental da estrutura, e as normas internacionais apresentam considerações a respeito do controle de qualidade da produção, claramente definidos.

A norma européia, em sua tabela A.1, traz 18 condições de exposição para estruturas de concreto. A americana, na tabela 19.3.1.1, traz 13 condições de exposição e a brasileira, na tabela 6.1, apenas 4.

3 OBJETIVOS GERAIS

O presente artigo objetiva, de forma global identificar e determinar o avanço da frente de carbonatação em estruturas de concreto armado.

4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos pretendidos com o desenvolvimento do presente artigo são identificar a ocorrência do processo de carbonatação em estruturas de concreto armado, em edificações com o tempo de vida útil maior ou igual a 5 (cinco) anos, inseridas em diferentes classes de agressividade ambiental e quantificar as principais variáveis envolvidas no avanço da frente de carbonatação.

5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Os dados referentes às características do concreto não foram disponibilizados pelos administradores/proprietários das obras (amostras) estudadas.

No que tange as recomendações para a realização do ensaio de carbonatação, a DIN EN 14630:2007 define que se deve evitar cortar as estruturas que serão submetidas ao ensaio por aspersão de fenolftaleína, pois acarreta resultados pouco precisos, além de liberar álcalis que não foram hidratadas na pasta de cimento diminuindo a porosidade do concreto.

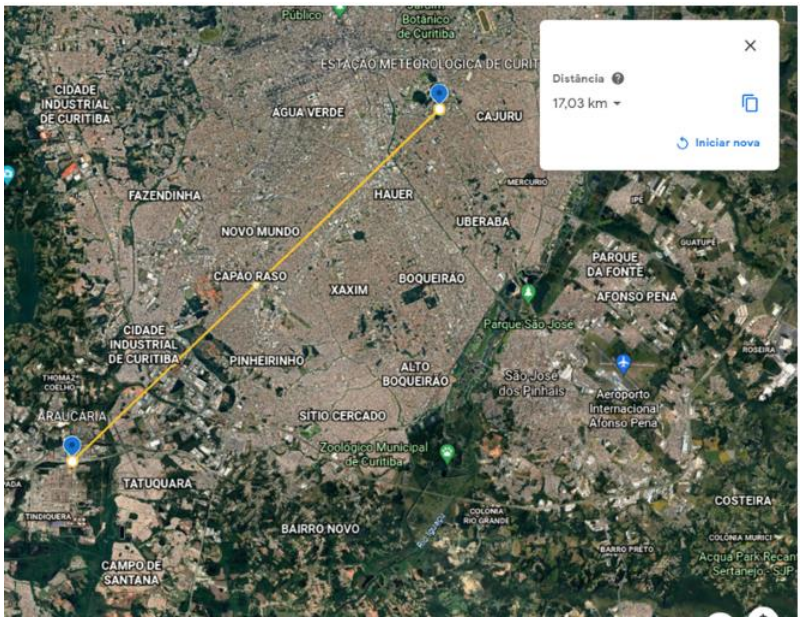
Vale ressaltar que o objetivo geral da pesquisa, se centra em identificar estruturas carbonatadas sem aprofundamento a outras análises complementares, como a determinação da

absorção capilar (ensaio que seria comprometido ao realizar o corte de estruturas). Dessa forma, a metodologia adotada para verificação da ocorrência ou não do processo de carbonatação, mostra-se satisfatória.

Ressalta-se ainda, que as edificações estudadas, encontram-se em uso e considerando que o ensaio para determinação da profundidade de carbonatação é um ensaio destrutivo, quebrar a estrutura em uma grande profundidade poderá trazer riscos a integridade estrutural. Um segundo fator preponderante para a escolha da utilização de furadeira neste estudo, é a dificuldade de repor os itens de acabamento (das estruturas que serão ensaiadas, em especial, as localizadas na cidade de Paranaguá, que são de uso institucional).

No que se refere aos dados ambientais das amostras estudadas, eles foram fornecidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), a partir dos dados monitorados pelas estações meteorológicas locadas em pontos específicos do estado. Ressalta-se que o SIMEPAR não possui uma estação localizada na cidade de Araucária, contudo, por se tratar de uma região metropolitana, os dados referentes à temperatura e umidade relativa do ar considerada para a amostra 1, foram os dados registrados pela estação meteorológica localizada em Curitiba. A figura 7 apresenta a distância entre a estação meteorológica e a área de estudo considerada (amostra 1 – Araucária).

Figura 7 – Distância entre a estação de medição e área de estudo (amostra 1).



Fonte: Google Earth, 2021.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 ÁREA DE ESTUDO

A delimitação da área de estudo foi realizada com base nas definições da NBR 6118:2014, no seu item 6.4, que define parâmetros relacionados à agressividade do ambiente, em especial, os requisitos da tabela 6.1 – classes de agressividade ambiental. Conforme as definições normativas foram selecionadas obras localizadas nas cidades de Curitiba-PR, Araucária-PR e Paranaguá-PR, que representam as classes de agressividade II e III; ambiente urbano, industrial e marinho, respectivamente.

A NBR 6118:2014 define que a agressividade do ambiente está atrelada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independente das ações relacionadas aos esforços mecânicos, variações volumétricas e demais ações previstas no projeto estrutural. As classes de agressividade ambiental podem ser observadas na figura 8.

Figura 8 – Classes de agressividade ambiental conforme NBR 6118:2014

Tabela 6.1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

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

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

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

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

Fonte: NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – procedimento, 2014.

A área de estudo delimitada foi selecionada de forma que, cada obra inserida em seu respectivo ambiente, represente uma amostra onde os ensaios para determinação da ocorrência de carbonatação foram realizados. Por meio do levantamento de dados realizado foram selecionadas informações relevantes para a pesquisa. O quadro 2 traz os dados coletados das amostras em estudo.

Quadro 2 – Dados reunidos das amostras (obras) em estudo.

AMOSTRA	OCUPAÇÃO	LOCALIZAÇÃO	TEMPO DE VIDA (anos)	CLASSE DE AGRESSIVIDADE	COBRIMENTO NOMINAL (mm)
Obra 1	Edifício residencial	Araucária-PR	5	Industrial	40
Obra 2	Edifício residencial	Curitiba-PR	6	Urbana	30
Obra 3	Escola	Paranaguá-PR	8	Marinha	40

Fonte: A autora, 2021.

Para quantificar os fatores ambientais que influenciam o processo de carbonatação e seu avanço no interior do concreto, foram reunidos dados de concentração de CO2 na atmosfera, dados de temperatura e umidade relativa do ar de cada ambiente estudado. Os valores referentes à concentração de CO2, foram obtidos através de estudos dos autores Tutti (1982) para zona agressiva (marinha), Saeta e Vitaliani (2004) para a zona industrial e Papadakis e Efstathiou (2006) para zona urbana.

Os valores referentes à temperatura e umidade relativa do ar foram obtidos do banco de dados meteorológicos fornecidos pelo SIMEPAR (Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná).

6.2 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Os ensaios foram realizados com o objetivo de determinar a profundidade de carbonatação nas estruturas de concreto armado das obras estudadas. A realização do ensaio seguiu as especificações da norma europeia EN 14630:2007 (EUROPEAN STANDARDNORME, 2007) e as recomendações do RILEM CPC- 18 (RILEM TC 56-MHM, 1996)

As normativas citadas estabelecem as ações a serem realizadas para determinação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado moldadas *in loco*. As recomendações envolvem a identificação da carbonatação pelo método de aspersão da solução de fenolftaleína.

Para fins práticos, foi desenvolvida uma solução própria de fenolftaleína com os materiais e as proporções recomendadas pela normativa base. A preparação da solução consiste em dissolver 1 g de fenolftaleína em 70 ml de álcool etílico 95% e 100 ml de água

destilada. A solução deverá ser agitada até a homogeneização dos compostos e estará pronta para uso.

A solução de fenolftaleína reage em compostos com Ph básico > 9 e essa reação desencadeia uma coloração rosa violeta. Mantém incolor as áreas que apresentam Ph abaixo de 9, evidenciando o processo de carbonatação nas estruturas.

Para o ensaio *in loco* foi realizada a exposição do concreto com o auxílio de uma furadeira (furo realizado com diâmetro de 10 mm). Após a realização da exposição da peça, ela foi limpa com o auxílio de uma trincha de 1.1/2" (retirada do pó) e, em seguida, a solução de fenolftaleína foi borrifada na área exposta. Por ter efeito espontâneo, a medição da profundidade de carbonatação foi realizada imediatamente após a aspersão da solução, com o auxílio de um paquímetro com precisão de 0,01 mm. Foi realizado 1 (um) furo em 1 (um) dos pilares de cada amostra estudada. Devido à dificuldade de repor os elementos de acabamento a quantidade de furos foi limitada a 1 (um) furo por amostra.

A medição foi realizada a partir da superfície de concreto carbonatada (sem mudança de coloração) até o limite do concreto reagente, com coloração rosa violeta.

A figura 9 apresenta os materiais utilizados na concepção da solução de fenolftaleína.

As figuras 10, 11 e 12 apresenta imagens da realização do ensaio em cada amostra estudada.

Figura 9 – Materiais utilizados na preparação da solução de fenolftaleína

Fonte: A autora, 2021.

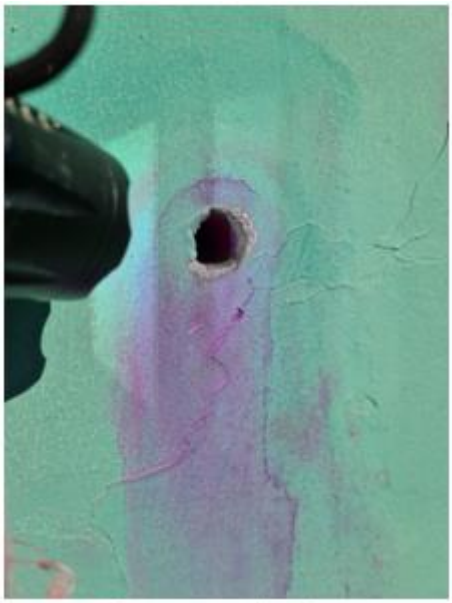
Figura 10 – Ensaio amostra 1 (Araucária – PR)

Fonte: A autora, 2021.

Figura 11 – Ensaio amostra 2 (Curitiba – PR)

Fonte: A autora, 2021

Figura 12 – Ensaio amostra 3 (Paranaguá – PR)



Fonte: A autora, 2021.

6.3 CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO

As condições de exposição foram determinadas através de verificação *in loco* anterior à realização do ensaio. Foi observado que todos os elementos ensaiados das 3 (três) amostras apresentavam a mesma condição de exposição: situados em ambiente externo e desprotegido de chuva. Ressalta-se que foram escolhidos os pilares externos extremos, pois são os únicos que possuem duas faces expostas às intempéries e logo, estão mais suscetíveis à ação do ambiente.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 CONDIÇÕES AMBIENTAIS

7.1.1 Teor de gás carbônico no ambiente

Conforme as definições de classe de agressividade ambiental, contidas na tabela 6.2 da NBR 6118:2014, pode-se usar valores de referência para concentração de CO_2 da atmosfera de cada obra estudada. Os valores da concentração de gás carbônico podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 - Teor de CO_2 dos ambientes estudados

Amostra	Local	Teor médio (%)	Autor
Obra 1	Zona industrial	0,045	Saetta e Vitaliani (2004)
Obra 2	Zona urbana	0,080	Papadakis e Efstathiou (2006)
Obra 3	Zonas agressivas	1,000	Tuutti (1982)

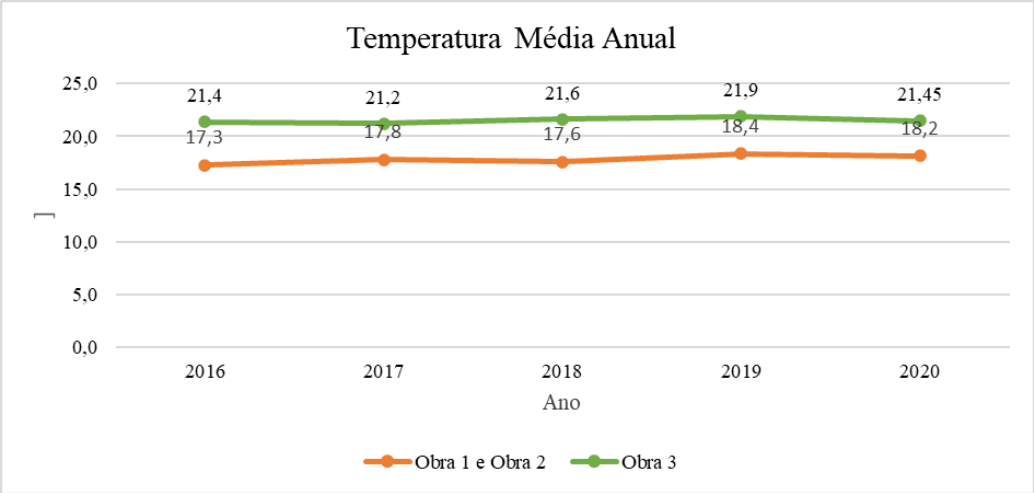
Fonte: adaptado de POSSAN, 2010.

A partir dos resultados observados, pode-se verificar que a obra 3 está localizada em ambiente com maior concentração de CO_2 estando propensa a sofrer o avanço da frente de carbonatação, em maior velocidade, comparada às demais amostras consideradas.

7.1.2 Temperatura

Com base no relatório meteorológico fornecido pelo SIMEPAR foram consideradas neste estudo as medições de temperatura média anual dos últimos 5 (cinco) anos. Tal intervalo foi determinado com base na data do "habite-se" de cada amostra, ou seja, no intervalo observado, todas as amostras já estavam em pleno uso/ocupação. Os valores de temperatura média anual da área de estudo podem ser observados no gráfico 1.

Gráfico 1 – Valores de temperatura no intervalo de tempo considerado.



Fonte: Relatório meteorológico SIMEPAR, 2021.

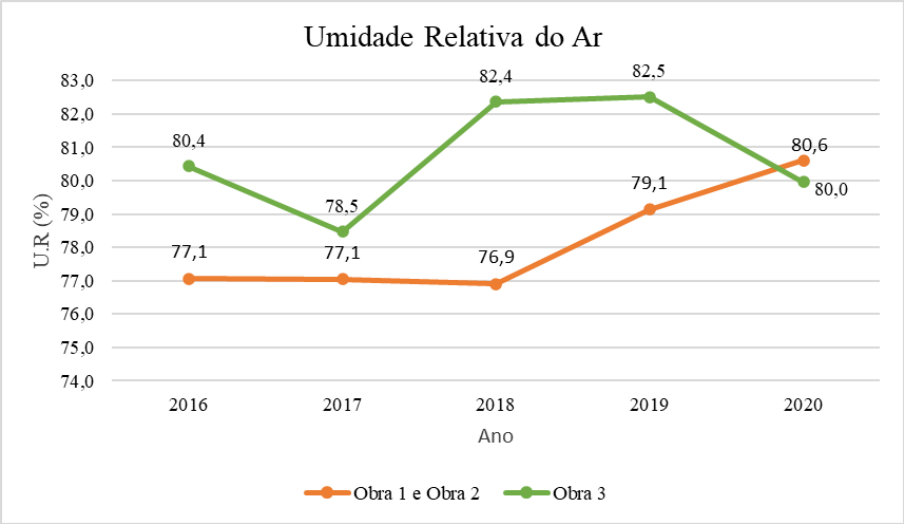
A partir dos resultados obtidos em relação à temperatura, pode-se notar que a variação no decorrer dos anos é pequena, apresentando pouca influência no avanço da frente de carbonatação. Contudo, a obra 3 está localizada em ambiente de maior temperatura

comparada às demais amostras observadas, o que possibilita maior velocidade de carbonatação nos elementos de concreto armado que a compõem.

7.1.3 Umidade relativa do ar

Com base no relatório meteorológico fornecido pelo SIMEPAR foram obtidas as medições de umidade relativa do ar, sendo a média anual dos últimos 5 (cinco) anos. Os valores de umidade relativa do ar dos anos de 2016 a 2020 da área de estudo, podem ser observados no gráfico 2.

Gráfico 2 – Valores de umidade relativa do ar no intervalo de tempo considerado.



Fonte: Relatório meteorológico SIMEPAR, 2021.

Ao serem observados os valores de umidade relativa do ar, pode-se afirmar que nenhuma das amostras localiza-se na faixa crítica para ocorrência de carbonatação (U.R entre 50 e 65%). Contudo, observa-se que a umidade relativa dos locais estudados está próxima da faixa crítica onde o grau de carbonatação é praticamente máximo, conforme observado na figura 6.

7.3 CARBONATAÇÃO

Com o auxílio do método de aspersão de fenolftaleína foi possível identificar a ocorrência de carbonatação em avanço nas 3 (três) amostras ensaiadas. Embora as amostras

possuam pouca disparidade em seu tempo de vida útil, as medições realizadas revelaram resultados distintos para cada uma delas. A tabela 3 apresenta os dados referentes à realização do ensaio bem como a profundidade de carbonatação medida em cada amostra estudada.

Tabela 3 – Avanço da frente de carbonatação medida nas amostras estudadas

Amostra	Classe de agressividade	Data do ensaio	Profundidade de carbonatação
Obra 1	Zona industrial	26/03/2021	17,28mm
Obra 2	Zona urbana	14/04/2021	10,09mm
Obra 3	Zonas agressivas	02/06/2021	35,01mm

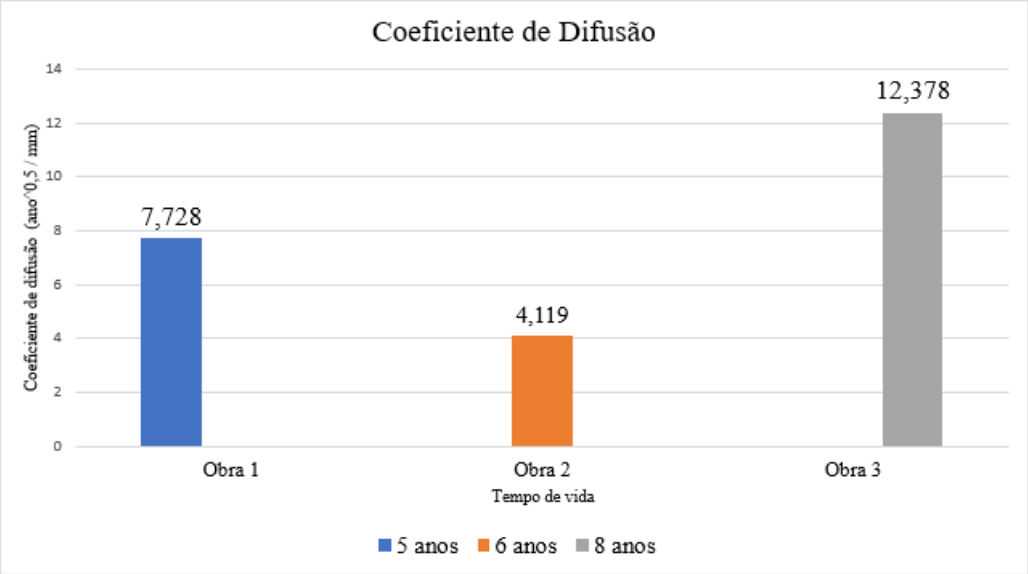
Fonte: A autora, 2021.

Ao observar os dados, é possível constatar um maior avanço da frente de carbonatação na obra 3. Contudo, essa mesma amostra possui um tempo maior de uso/operação que as demais, logo é necessário analisar o coeficiente de difusão para cada ambiente considerando as profundidades de carbonatação medidas.

O cálculo do coeficiente de difusão foi realizado através da equação $x=A.t^n$, em que $0<n<1$, definida por Sales et al (2020), sendo x representa a profundidade de carbonatação, A o coeficiente de difusão e t, o tempo (anos).

Na grande maioria dos estudos feitos até hoje se assumiu valor de 0,5 para n, de forma a tornar possível calcular o valor de A (SALES ET AL, 2020). O gráfico 3 apresenta os valores calculados do coeficiente de difusão de cada obra avaliada considerando o seu tempo de vida.

Gráfico 3 – Coeficiente de difusão das amostras estudadas.



Fonte: A autora, 2021.

Ao observar os dados do avanço da frente de carbonatação por ano, constata-se que a obra 3 apresenta maior avanço do processo no concreto de cobrimento, chegando próximo à camada protetora da armadura, ou seja, próximo da despassivação na fase do início do processo de corrosão.

8 CONCLUSÃO

A abordagem do estudo Investigação em Estruturas de Concreto Armado Suscetíveis à Deterioração por Carbonatação em Três Ambientes Distintos possibilita às seguintes conclusões:

a) Há uma preocupação em saber dos itens tratados na norma de desempenho, e as requisições por ela definidas, mas pouco se sabe das propriedades isoladas de cada material componente da edificação. Logo, há um déficit em atender os requisitos de vida útil para os sistemas e subsistemas descritos na mesma.
b) As prescrições contidas na NBR 6118:2014 para a elaboração de estruturas em concreto, não levam em consideração, os processos de deterioração que o mesmo possa sofrer em sua fase de uso.
c) A busca pela “falsa economia” é a grande responsável pelo processo de deterioração de estruturas de forma acelerada, pois ao reduzir 5 mm de cobrimento do concreto na fase do projeto, é diminuída a camada de proteção das armaduras. A recuperação de

um concreto carbonatado, na fase de uso/operação, implicará em refazer essa camada inteira com uma nova concretagem;

d) Estruturas inseridas em locais com classe de agressividade elevada devem ser projetadas para suportar as intempéries incidentes sobre ela. Vale ressaltar, que o tamanho do cobrimento não será suficiente para resistir aos agentes agressivos; a qualidade do concreto tem papel tão importante quanto o cobrimento, pois garantirá a integridade da estrutura para retardar o processo de carbonatação e até mesmo impedi-lo.

As condições ambientais propiciam meios para que a carbonatação ocorra nas estruturas de concreto armado, sendo necessária, uma ação constante de prevenção por meio das inspeções periódicas. O ensaio com aspersão de fenolftaleína mostra-se bastante eficiente para o diagnóstico do avanço da carbonatação no interior do concreto, ainda permite definir o quanto deste concreto deverá ser recuperado/refeito.

Face o exposto, destaca-se a preocupação com o concreto de cobrimento. Garantir a sua proteção é de extrema importância para evitar a entrada de agentes agressivos em seu interior. Essa proteção pode ser realizada através de uma cobertura impermeável que evitará o ingresso de substâncias fluídas. A camada protetora impermeável do concreto pode ser obtida através de materiais de simples acesso no mercado da construção, como tintas orgânicas, ou seja, tinta à base de resina epóxi, acrílica, poliuretana, vinílica, tintas asfálticas e betume. Vale ressaltar que realizar a manutenibilidade da pintura é mais econômico do que refazer um cobrimento de concreto.

Por fim, verifica-se que há a necessidade de encarar o processo de dimensionamento, execução e manutenção de estruturas de forma mais analítica e global, pois a cultura do profissional na construção civil está fadada a seguir prescrições normativas eximindo sua responsabilidade e contribuição técnica no processo. Sabe-se que cada material possui suas particularidades, tanto em suas propriedades, como em sua composição química.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. (2014) ACI 318M-14: **Bulding Code Requeriments for Structural Concrete**. Farmington Hills.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5674: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16747: Inspeção predial - Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento.** Rio de Janeiro, 2020.

BSI – British Standards Institucion.(2016**) BS EN 206:2013 + A1: Concrete. Specification, performance, production and conformity.** Brussels.

CUNHA, A. J. P. D; SOUZA, V. C. M. D; LIMA, Nelson Araújo. **ACIDENTES ESTRUTURAIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1996. p. 1-202.

EN 14630:2007. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method**.

FILHO, R. C. C. E. J. R. D. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2007. p. 1-365.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1986. p. 1-56.

HELENE, Paulo. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1992. p. 1-211.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1987. Concrete Durability: A Multibillion-Dollar Opportunity. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/19191>. Acesso em: 26 mar. 2021.

MIRANDA, L. R. M. D; RESENDE, F. G. D; CAPUZZO, V. M. S. Avaliação da durabilidade do concreto autoadensável com diferentes teores de fíler calcário em substituição ao cimento Portland. **V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales**, Valêncía, v. 1, n. 1, p. 1-10, mar./2018.

MONTEIRO, P. K. M. P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3. ed, 2005. p. 1-659.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. p 1-888.

NEVILLE, A.M. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. p 1-447.

PERDRIX, M. D. C. A. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**: tradução e adaptação de Antonio Carmona e Paulo Helene. 1. ed. São Paulo: PINI, 1992. p. 1-109.

PEREIRA, Priscila Souza. **PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DE EDIFÍCIOS PARA AS UNIDADES DE ATENÇÃO PRIMÁRIA À SAÚDE DA CIDADE DE JUIZ DE FORA.** UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO, Juiz de fora, v. 1, n. 1, p. 1-109, nov./2011. Disponível em: https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/2146. Acesso em: 20 mar. 2021.

POSSAN, Edna. **MODELAGEM DA CARBONATAÇÃO E PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO EM AMBIENTE URBANO.** Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 1-265, jun./2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/284712403_Modelagem_da_carbonatacao_e_previsao_de_vida_util_de_estruturas_de_concreto_em_ambiente_urbano>. Acesso em: 23 mar. 2021.

RILEM CPC- 18. **Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method**. Disponível em: <https://www.rilem.net/>. Acesso em: 5 mar. 2021.

SALES, A. et al. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto:** teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2 ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020. p 1-370.

SEEG BRASIL. **Novas Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Brasil** - 2019. Disponível em: <http://seeg.eco.br/>. Acesso em: 16 mai. 2021.

SITEMA DE TECNOLOGIA E MONITORAMENTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Dados das estações**. Disponível em: <http://www.simepar.br/>. Acesso em: 28 mai. 2021.

TUUTTI, Kyösti. **CORROSION OF STEEL IN CONCRETE**. 4. ed. Estocolmo: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. p. 1-472