https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.040

ANÁLISE DA DURABILIDADE DO CONCRETO FRENTE À CARBONATAÇÃO E ATAQUE DE CLORETOS: ESTUDO DE CASO EM EDIFÍCIOS DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL

Julia Spiller Vidal[1], Fernanda Pacheco[2]*; Camila Simonetti[3]; Hinoel Zamis Ehrenbring[2]; Roberto Christ[2]; Maria Fernanda de Oliveira[2]

*Autor de contato: fernandapache@unisinos.br

[1] Graduação em Engenharia Civil, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil
[2] Instituto tecnológico em desempenho e construção civil, itt Performance, UNISINOS, São Leopoldo, Brasil
[3] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise da durabilidade de estruturas em concreto frente à penetração de íons cloreto e carbonatação, em edifícios localizados no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Contou-se com inspeção em três edifícios localizados em Capão da Canoa e avaliação da presença de íons cloreto e carbonatação nas estruturas. Para tal, foram realizados furos e coleta de pó, e através dos indicadores colorimétricos de nitrato de prata e fenolftaleína, foram verificados a presença de íons cloreto e de carbonatação, respectivamente. Constatou-se que o cobrimento utilizado nas obras não atende aquele previsto em norma para a determinada classe de agressividade ambiental do local. Os resultados obtidos mostraram a presença de pelo menos um agente agressivo na camada relativa as armaduras em todos os edifícios, demonstrando assim a importância da utilização do cobrimento previsto em norma e de materiais de boa qualidade, que garantam a durabilidade da estrutura e sirvam como uma barreira ao ingresso de agentes agressivos. Percebeu-se em alguns pontos a concomitância no ataque por cloretos e por carbonatação.
Palavras-chave: durabilidade; concreto; cloretos; carbonatação.

ABSTRACT

The present work presents an analysis of the durability of concrete structures against the penetration of chloride ions and carbonation, in buildings located on the north coast of Rio Grande do Sul. An inspection of three buildings located in the city of Capão da Canoa was carried out and the presence of chloride ions and carbonation in the structures was evaluated. For this, holes were made, and dust was collected, and through the colorimetric indicators of silver nitrate and phenolphthalein, the presence of chloride ions and carbonation was verified. It was found that the concrete cover used in the structures does not attend the standard for the class of environmental aggression of the region. The results showed the presence of at least one aggressive agent in the layer relating to the reinforcement in all buildings, thus demonstrating the importance of using the standard covering and of quality materials, which guarantee the durability of the structure and serve as a barrier to the entry of aggressive agents. It was noticed in some points the concomitance in the attack by chlorides and carbonation.
Keywords: durability, concrete, chloride, carbonation.

1. INTRODUÇÃO

Um dos parâmetros de maior relevância em estruturas de concreto é sua capacidade resistente. Porém, além desse parâmetro, a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) lista dois requisitos de qualidade: o desempenho em serviço e a durabilidade. A durabilidade é definida pela norma como a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Dentre os fenômenos que acarretam a diminuição da durabilidade, a corrosão da armadura é o maior índice de ocorrência e reflete diretamente na diminuição da vida útil da estrutura (HELENE, 1993).

Segundo Gentil (1996), a corrosão se dá pela deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, ou não, a esforços mecânicos. Três fatores são os principais responsáveis pela corrosão das armaduras: o meio aquoso, a ação de cloretos e a carbonatação. Segundo Han et al (2013) e Li et al (2018), a carbonatação e o ataque por cloretos são os principais agentes agressivos que desencadeiam esse dano.

Não apenas a bibliografia apresenta o ataque por íons cloreto como danoso, mas também, percebe-se em normas técnicas nacionais e internacionais a atenção para a especificação de estruturas próximas a presença de íons cloreto, dado seu elevado potencial de dano (ABNT NBR 6118; AS 3600; EN 1992-1). Segundo Shen et al. (2019), estruturas de concreto armado inseridas em atmosfera marinha estão expostas a severas condições. Ainda, segundo os autores, soma-se a presença inevitável de dióxido de carbono na atmosfera em qualquer ambiente, e a concentração do mesmo estar aumentando gradativamente. Segundo Yoon et al. (2007), essa taxa aumenta 0,5% ao ano, em escala global. A carbonatação ocorre devido a difusão do gás carbônico, presente na atmosfera, para o interior do concreto, onde ocorre a dissolução dos hidratos, levando a queda do pH para valores abaixo de 9 (THIERY et al., 2006). Este processo leva a despassivação da camada que protege as armaduras, causando a corrosão.

Wang et al. (2017) destacam a importância de considerar os efeitos combinados dos íons cloreto e da carbonatação nas estruturas em ambiente marinho ou condições similares. Visto que, com as mudanças climáticas, a temperatura vem aumentando ao longo dos anos, outro fator que propicia o processo de carbonatação e o ingresso de íons cloreto na estrutura (YOON et al., 2007). Para destacar essa pertinência, cabe-se citar que o Brasil possui uma faixa litorânea com mais de 7.000 km de extensão. Nesta região de zona marinha atmosférica, o dióxido de carbono e a névoa salina existem concomitantemente e o ataque combinado de carbonatação e íons cloreto em estruturas de concreto está sujeito a ocorrer (LIU et al., 2017).

Buscando-se avaliar a durabilidade de estruturas de concreto armado expostas a esse tipo de degradação, este trabalho analisou a carbonatação e a penetração de cloretos em três edifícios residenciais localizados no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, na cidade de Capão da Canoa. Através da coleta de amostras de pó de concreto, foi possível verificar, com o uso de indicadores químicos, a presença ou não dos agentes agressivos e determinar sua profundidade.

2. DURABILIDADE DO CONCRETO E AMBIENTES DE EXPOSIÇÃO

Sabe-se da relevância quanto ao conhecimento das características do concreto, bem como de suas propriedades, tal qual seu ambiente de exposição e seus potenciais agentes de degradação. Segundo Romano (2009), a degeneração do concreto armado é um processo natural devido à interação desta

com o meio ambiente, que possui diferentes níveis de agressividade. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a agressividade do ambiente tem relação com as ações físicas e químicas que atuam nas estruturas de concreto armado, não dependendo de ações mecânicas, variações volumétricas de origem térmica, retração hidráulica ou qualquer outro parâmetro de dimensionamento. Dentre as classes, nota-se as classes III e IV com alusão a ambientes marinhos e de respingos de maré, respectivamente, sendo classificações que contam com um maior rigor para a conservação das estruturas devido a presença dos íons cloreto (MEDEIROS, 2013).

2.1 Corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras no concreto armado é considerada por diversos pesquisadores, o principal problema da indústria da construção civil por representar um sério risco a integridade estrutural destes elementos (MEDEIROS, 2008; SADOWSKI, 2013; VAN ZIJL; PAUL, 2018; BALESTRA et al, 2020). Ouglova et al (2006) destacam ainda que este é um problema tanto do ponto de vista da segurança quanto do ponto de vista econômico. A corrosão pode chegar ao nível de causar perda de seção transversal das barras e desgaste no cobrimento, fato este que afeta a segurança e uso da estrutura (HAN et al, 2013).

O conceito de corrosão, segundo Bolina et al (2014), se dá pela iteração entre o metal e o meio em que ele se encontra, causando sua dissolução em íons metálicos, através de processos eletroquímicos. A probabilidade de corrosão em uma estrutura de concreto armado depende de diversos fatores, como a condutividade iônica do concreto, a umidade, a temperatura e a qualidade do concreto de cobrimento (SADOWSKI, 2013). Segundo Da Silva et al (2009) a corrosão das armaduras está diretamente ligada aos processos de carbonatação e ataque por cloretos, que ao ingressarem no concreto induzem a despassivação das barras de aço.

Papadakis et al (1991) destacam que, estruturas inseridas em ambientes marinhos, costas ou ao entrarem em contato com sais de degelo, estão sujeitas aos íons cloretos, que são os principais causadores da iniciação da corrosão. Os íons Cl^- ingressam na estrutura através dos poros do concreto e, ao atingirem valores críticos, promovem a despassivação da armadura, sem que cause alterações químicas ou físicas no cimento Portland hidratado (MEDEIROS, 2013; BOLINA et al., 2014). Romano (2009) ressalta que, além da despassivação da armadura, os íons cloreto aumentam a condutividade elétrica, o que acelera o processo de corrosão. Ainda, aumentam o volume da armadura e causam manchas e fissuras na estrutura de concreto armado, podendo levar ao colapso.

Outro agente agressivo que provoca a corrosão é o dióxido de carbono (CO_2). Ao adentrar no interior do concreto, o CO_2 reage com os produtos de hidratação do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio. Esta reação diminui o pH da solução porosa, que normalmente possui valores próximos a 13, para valore abaixo de 9, o que afeta o filme de passivação que protege as armaduras da corrosão e levando a uma diminuição na seção transversal do aço (LI et al, 2018).

2.2 Simultaneidade do ataque por cloretos e carbonatação

Quando avaliada a simultaneidade dos efeitos da carbonatação e da penetração de cloretos, Yoon et al (2007) citam que o risco de corrosão devido a carbonatação não é tão sério quanto aquela causada pelos íons cloretos. No entanto, é importante ressaltar que este ataque combinado não deve ser visto como um benefício para a estrutura, pois este ataque combinado ainda é altamente perigoso em relação a corrosão das armaduras.

As principais causas da corrosão da armadura, e a consequente deterioração do concreto, são o ataque por cloretos e o processo de carbonatação (DA SILVA et al, 2009). Sabe-se que estes dois agentes agressivos estão presentes na atmosfera, e que podem atacar uma estrutura simultaneamente. Segundo Liu et al (2017), a ação combinada de penetração de cloretos e carbonatação pode levar a severas deteriorações nas estruturas de concreto armado e, consequentemente, causar impacto na sua vida útil. Se ainda for levado em conta os processos de molhagem e secagem que as superfícies expostas as intempéries estão sujeitas, a degradação pode ser ainda maior (YE et al,2016) Devido a esta preocupação, a simultaneidade do ataque por cloretos e o processo de carbonatação é um assunto amplamente abordado na literatura.

Segundo Wang et al (2017), a influência deste efeito combinado depende da sua sequência de ocorrência. Um concreto já afetado pelo ataque de cloretos, quando exposto a carbonatação, pode sofrer consequências como a diminuição da porosidade e a quebra de ligações iônicas, deixando livres os cloretos que antes estavam combinados (SHEN et al, 2019). O processo de carbonatação também afeta a difusividade dos cloretos. Li et al (2018) citam os seguintes mecanismos como responsáveis pela mudança desta propriedade:

a) A precipitação da calcita ($CaCO_3$) que preenche o espaço dos poros e, consequentemente, reduz a porosidade, modificando a estrutura dos mesmos;
b) Ao afetar a química dos poros, o ambiente iônico para o transporte de cloretos também é afetado, fazendo com que a difusidade aquosa seja alterada;
c) A partir do consumo dos hidratos de silicato de cálcio (CSH), os cloretos combinados são liberados e enviados de volta a solução dos poros, afetando assim a difusividade aparente dos cloretos.

A maior preocupação em relação aos concretos que sofrem carbonatação após o ataque de cloretos está nos íons cloreto combinados. Apesar da corrosão das armaduras estar diretamente ligada aos cloretos livres, os cloretos combinados devem receber atenção especial, pois, sob efeito do CO_2, os cloroaluminatos presentes na pasta de cimento podem desagregar e tornar os cloretos livres (ANDRADE, 1992; LIU et al, 2017). Wang et al. (2017) destacam que os efeitos na distribuição dos íons cloreto no interior do concreto dependem da duração da exposição aos agentes agressores e do tipo de ligante utilizado.

Em contraponto, o concreto carbonatado exposto ao ataque por cloretos sofre alterações no seu pH e na estrutura dos poros, em um ponto de vista positivo. Segundo Liu et al (2017), concretos carbonatados sem a presença de cloretos possuem um valor de pH significativamente mais baixo em relação a uma estrutura que sofre o ataque combinado, levando a um retardo no processo de carbonatação devido a penetração de cloretos. Outro ponto citado pelos autores se dá pela mudança na estrutura física dos poros pela carbonatação, que densifica os poros e reduz a penetração de cloretos na camada superficial. No entanto, é necessário levar em conta que o processo de carbonatação pode induzir a formação de microfissuras na estrutura, próximas a região superficial, o que facilita a entrada de agentes agressivos, no caso desta ação combinada, os íons cloreto (WANG et al, 2017).

Ao avaliar o risco de corrosão de armaduras quando a estrutura sofre o ataque combinado, Yoon et al (2007) consideram que a agressão causada pela carbonatação não é tão séria quanto aquela gerada pelos íons cloreto. Segundo Liu et al (2017), é de extrema importância entender os processos físico-químicos que ocorrem entre a carbonatação e o ataque de cloretos, para a previsão da vida útil de estruturas em concreto armado situadas em zonas de atmosfera marinha. No entanto, Wang

et al (2017) ressaltam a complexidade dessa interação entre carbonatação e penetração de cloretos, tornado os efeitos na iniciação da corrosão menos claros.

3. METODOLOGIA

O programa experimental foi dividido em três fases. A primeira fase é compreendida pela inspeção das estruturas e coleta de amostras. Na segunda fase, as amostras coletadas foram expostas à indicadores colorimétricos para avaliação da presença de carbonatação e íons cloreto. A terceira fase consiste na análise dos resultados e análise da aplicabilidade de modelos teóricos de previsão. A inspeção foi realizada no dia 19 de abril de 2021, em três edificações localizadas na cidade de Capão da Canoa, situada no litoral norte do estado do Rio Grande do Sul, com diferentes distâncias em relação ao mar. Os três prédios possuem características estruturais similares, compostos por vigas, pilares e lajes em concreto armado e paredes em alvenaria. Conforme fornecido pelas construtoras responsáveis pelas obras, foi adotado cobrimento de 30 mm em todas as edificações. A edificação "A" fica localizada a uma distância de aproximadamente 30 metros do mar (Figura 1(a)). O edifício foi construído em 2013, possui 12 pavimentos, sendo o térreo destinado ao acesso e à garagem, onde foi realizada a coleta.

Figura 1 – Fachada do (a) Edifício A, (b) Edifício B e (c) Edifício C



(a) (b) (c)

Fonte: os autores.

Através de uma breve inspeção visual não foi constatada nenhuma manifestação patológica aparente, estando a estrutura em bom estado aparente de conservação. Segundo o administrador do condomínio, nenhuma reforma significativa foi realizada nos últimos anos.

O segundo prédio, denominado como "B", localiza-se a aproximadamente 60 metros da beira da praia. Esta edificação possui 10 anos de idade e conta com 9 pavimentos, os dois primeiros pavimentos (térreo e segundo andar) são destinados a garagem, sendo o pavimento superior o local onde a análise foi realizada. Após uma breve análise visual foi constatada a inexistência de manifestações patológicas aparentes, além de não terem sido realizadas reformas significativas nos últimos anos.

O último edifício analisado, denominado como "C", localiza-se a aproximadamente 400 metros de distância da faixa de areia. O prédio foi construído no ano de 2014 e possui 10 pavimentos, sendo os dois primeiros destinados a garagem, onde foi realizada a análise. Neste edifício, com a análise

visual realizada, foram constatados diversos pontos com presença de “bolor”, devido a umidade, como é possível visualizar na Figura 2. Em conversa com o administrador do condomínio foi relatado que os problemas devido a umidade ocorrem desde os primeiros anos da construção e que diversas tentativas de reparo foram realizadas, porém nenhuma delas obteve sucesso, fazendo com que as manchas voltassem a aparecer após um curto período.

Figura 2 – Manchas causadas pela umidade na garagem



Fonte: os autores.

Para realizar a análise da frente de carbonatação e de cloretos foram coletadas amostras de pó de concreto. Em cada edifício um pilar foi perfurado. No pilar escolhido, foram realizados seis furos e coletadas amostras de três profundidades diferentes, totalizando 18 amostras. Do total de amostras, 9 delas foram destinadas à análise da frente de carbonatação e as restantes destinadas à análise da penetração de íons cloretos. Após retirar a camada superficial de reboco, com o auxílio de uma furadeira com broca de 8mm e um palito de madeira com marcação a cada 10 mm, foram realizados os furos em três etapas, para coletar o pó em profundidades diferentes. A primeira perfuração foi realizada até atingir 10 mm de profundidade, a segunda 20 mm e a terceira 30 mm, podendo haver variação de 5 mm entre as perfurações. Decidiu-se parar as perfurações na profundidade de 30 mm, pois esta coincide com a espessura de cobrimento adotada, evitando assim qualquer interferência nas armaduras. Após cada etapa de perfuração foi coletado o pó e armazenado em sacos plásticos identificados, para posterior análise.

A análise da frente de carbonatação se dá através da aspersão de indicador colorimétrico de solução de fenolftaleína (1% de concentração) nas amostras. Há variação na sua coloração conforme o pH do material: ao interagir com fragmentos carbonatados, o líquido permanece incolor. Sua coloração muda para violeta se não houver presença de carbonatação. Foram analisadas as três amostras de cada furo, com profundidades de 10 mm, 20 mm e 30 mm, para cada edifício. Para uma melhor identificação das amostras foram utilizadas siglas que contém as informações do edifício, furo e profundidade. Para analisar a presença de íons cloretos na estrutura, foi aspergida solução de nitrato de prata, que permanece incolor em contato com o agente agressivo, mudando sua coloração para um tom próximo ao marrom quando não há presença de cloretos. Em consonância com a avaliação da carbonatação, foram avaliadas três amostras para cada furo, com profundidades de 10 mm, 20 mm e 30 mm, em cada um dos edifícios.

A temperatura média ao longo do ano varia entre 12 ºC e 28 ºC (WEATHER SPARK, 2021). A época mais quente, onde as temperaturas máximas estão acima de 26 ºC, se dá entre os meses de dezembro e março. Os meses com as menores temperaturas, com mínimas abaixo de 14 ºC são junho, julho e agosto. A resistência à carbonatação e à penetração de cloretos é reduzida em altas

temperaturas (YOON et al., 2007), por isso deve-se considerar que em alguns meses do ano as estruturas podem estar mais suscetíveis ao ingresso desses agentes agressivos.

4. RESULTADOS

4.1 Profundidade de carbonatação

Todos os pontos vistoriados no prédio A, apresentaram coloração violeta desde a sua superfície, ou seja, sem a presença de carbonatação. Na edificação B, no entanto, percebeu-se até a profundidade de 30 mm (cobrimento) o concreto já contando com dióxido de carbono. Na edificação C, também até a espessura do cobrimento (30 mm), todos os pontos apresentaram carbonatação. A ausência de carbonatação na edificação A ocorre no ambiente de garagem. Uma hipótese para justificar a inexistência deste fenômeno é a presença de uma camada mais espessa de argamassa, que pode funcionar como uma barreira para o ingresso desses agentes no concreto.

Segundo Malheiro et al. (2013), dependendo de suas características e da forma como foi aplicada, as argamassas de revestimento podem desempenhar um papel importante de proteção para o concreto. Além disso, a qualidade do concreto é outro fator que influencia na penetração de CO_2 na estrutura. Fatores relacionados a composição do concreto, como a quantidade de ligantes, agregados e água influenciam diretamente na profundidade de carbonatação (PAUL et al, 2018). Outro fator que pode ter auxiliado na proteção do pilar é sua pintura.

Costa e Appleton (2001) em sua pesquisa, para avaliar a penetração de cloretos e carbonatação em diferentes condições de exposição, tiveram um dado parecido, onde um dos corpos de prova não apresentou carbonatação. Segundo os autores uma das explicações para este fato está associado a um elevado consumo de cimento, que gera um acúmulo de compostos alcalinos, inibindo a penetração de agentes agressivos na estrutura.

Um segundo ponto importante a se avaliar é o fato de os edifícios B e C terem apresentado profundidades de carbonatação de 30 mm, coincidindo com a espessura de cobrimento das armaduras. Uma característica do concreto que é importante se avaliar neste caso é sua permeabilidade, pois ela interfere na velocidade de penetração de CO_2, facilitando o transporte por meio da difusão (SILVA et al, 2019). O resultado encontrado nestes dois edifícios gera uma preocupação, pois ao atingir as armaduras, a carbonatação pode despassivar o filme de proteção e iniciar o processo de corrosão, trazendo sério risco a estabilidade e durabilidade da estrutura. Faz-se necessária uma inspeção mais detalhada para verificar a necessidade de correções na estrutura visando sua segurança e manutenção da vida útil.

Uma observação relevante a se fazer no caso destes dois edifícios é o fato do cobrimento utilizado estar abaixo do recomendado em norma, diminuindo assim a proteção das armaduras e ressaltando a importância de realizar um bom projeto seguindo as normativas necessárias, para que assim, a durabilidade da estrutura seja garantida.

4.2 Profundidade de ataque por íons cloreto

No edifício A, notou-se que dentre os três furos verificados foi constatada profundidade de dano de 30 mm em dois deles, sendo que o terceiro apontou que o concreto permanecia são. Em um dos furos percebeu-se a presença de cloretos nas profundidades de 10 e 30 mm, sendo que a profundidade intermediária de 20 mm não apontou sua presença. Essa inconsistência pode ser

devido a característica heterogênea do concreto. Segundo Fonseca (2017), a distribuição dos poros capilares, responsáveis pelo transporte dos íons cloretos dentro do concreto, não é homogênea, e, portanto, pode levar a diferenças na sua composição. Há também a possibilidade de existência de falhas ou vazios não detectados no interior da estrutura, afetando assim a contaminação gerada pelos íons cloretos no concreto. No entanto, por se tratar de um edifício próximo ao mar (com aproximadamente 40 metros), é esperado que a penetração de cloretos seja intensa, mesmo se tratando de um local interno, protegido da ação direta da névoa salina.

O edifício B apresenta coloração cinza na primeira camada de todos os furos, indicando presença de cloretos. Na profundidade de 20 mm apresenta uma leve variação para o marrom, que pode indicar uma diminuição na quantidade de agentes agressivos. Já na camada de 30 mm não há mais a presença de íons cloretos. Sendo assim, foi adotada uma profundidade de 20 mm para estes furos, para fins de segurança.

Em relação ao edifício C, algumas amostras foram descartadas devido a uma possível contaminação com alvenaria, proveniente de um preenchimento com tijolos cerâmicos no pilar. Nos outros furos a mudança na coloração se deu na camada de 30 mm, indicando assim até essa espessura a presença de cloretos. Novamente, é importante ressaltar a interferência do cobrimento utilizado em comparação com o estipulado em norma, que seria de 40 mm, garantindo assim uma maior proteção ao pilar e possivelmente, evitando que os íons atingissem a armadura. As amostras dos edifícios B e C, apresentaram a maior profundidade de penetração de cloretos, igual a 20 mm, não atingindo a espessura de cobrimento das armaduras e assim mantendo sua estabilidade, quando analisado individualmente o ataque por cloretos. O que deve ser citado, no entanto, é que o ataque por íons cloreto pode ocorrer com elevada velocidade, tendo após a fase de iniciação a fase de propagação, e assim, cabe uma inspeção mais detalhada e possivelmente uma intervenção no local.

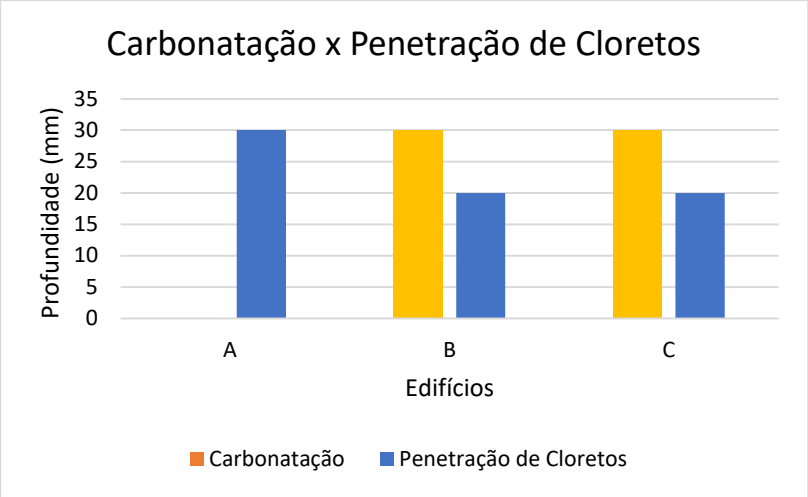
Romano (2009) constatou que as faixas de maior agressividade por cloretos se encontram nos primeiros 100 a 200 metros de distância ao mar, mas o edifício C se encontra a uma distância aproximada de 400 metros, o que indica que alguns fatores de composição do concreto podem ter influenciado para este valor de profundidade. Vale ressaltar que a garagem onde o local estava localizado apresentava manifestações patológicas devido a umidade presente no local, fator este que pode contribuir para a penetração de cloretos. O fato das estruturas avaliadas estarem localizadas em ambientes internos, protegidos da chuva e do ataque direto de cloretos provenientes dos ventos deve ser um parâmetro a se considerar, visto que a deterioração poderia ser mais agravada em ambientes externos, sujeitos a intempéries.

4.3 Simultaneidade de efeitos

Segundo Liu et al. (2017), a presença concomitante de névoa salina e dióxido de carbono na zona de atmosfera marinha pode levar a um ataque combinado no concreto, podendo causar severa deterioração, principalmente quanto a vida útil da estrutura. Por isso, é importante analisar a simultaneidade destes fenômenos. Para realizar esta análise, foi utilizada a maior profundidade identificada em cada edifício e gerado gráfico na Figura 3.

Os resultados do edifício A mostram a presença de cloretos e a inexistência de carbonatação, isto pode ser justificado pela possível densificação da estrutura porosa causada pelo ingresso de cloretos, gerando uma resistência a penetração de CO_2, mantendo o pH alto e levando a uma menor, ou neste caso nula, profundidade de carbonatação (LIU et al., 2017).

Figura 3 – Comparativo entre carbonatação e penetração de íons cloretos



Fonte: os autores.

No estudo de Alves (2019), a autora também verificou uma elevada resistência à carbonatação em edificação localizada próxima à uma rodovia de alto fluxo, e altura vinculou isso a elevada qualidade e compacidade do concreto empregado.

Percebe-se que nos edifícios B e C, tanto a carbonatação como os íons cloretos penetraram em maior profundidade em conjunto. Em geral, o processo de carbonatação em concretos contaminados com cloretos resulta na liberação dos cloretos combinados, empurrando os íons cada vez mais para dentro da estrutura, podendo atingir a camada das armaduras (WANG et al, 2017). Outra possível causa é a presença de maiores quantidades de vazios no concreto ou a utilização de uma relação a/c mais alta, que influencia no aumento do coeficiente de difusão dos íons cloretos (LIU et al, 2017). Vale ressaltar que a melhor escolha para ambientes de alta agressividade é um concreto com baixa porosidade, que não permita a penetração de CO_2 ou Cl^-.

Costa e Appleton (2001) estudaram durabilidade de concretos expostos a zona de atmosfera marinha, onde obtiveram uma alta taxa de carbonatação, enquanto a taxa de penetração de cloretos foi mínima, diferente do encontrado nesta pesquisa, onde as maiores profundidades de carbonatação coincidiram com as maiores profundidades de cloretos. Ou seja, a formação de carbonato de cálcio não colmatou os poros de modo que eles se tornassem menos susceptíveis a presença de cloretos.

Vale ressaltar que este método de análise, por ser simples e não considerar diversos aspectos da estrutura, deve ser utilizado como uma análise preliminar, para constatar a possível presença de agentes agressivos. Ao apresentar profundidades próximas a armadura é de extrema importância a realização de inspeções mais rígidas para que se possa escolher uma possível correção adequada a situação.

4.4 Aplicabilidade de modelos de previsão

Os modelos teóricos de frente de agressão por cloretos são caracterizados por apresentarem a necessidade de diversas variáveis de entrada, principalmente relacionadas às características do concreto utilizado, dados estes que não foram encontrados nesta pesquisa, devido a restrições das empresas responsáveis pelas obras. Como foi realizado um ensaio simples, que serve como análise prévia para entender a situação da estrutura, e então verificar a necessidade de ensaios mais

complexos, os modelos de previsão para ataque por cloretos não foram aplicados nesta pesquisa. Seguindo o mesmo caminho dos modelos de cloretos, a maior parte dos modelos de previsão de carbonatação também requerem variáveis de entrada complexas, relacionadas tanto com as características do concreto quanto do meio, como por exemplo, concentração de CO_2 no ar, que requer equipamento especializado para sua determinação. Entretanto, um método simples de previsão está baseado na Primeira Lei de Fick, que requer poucos dados de entrada e está presente na Equação 1.

$$x = k \,.\sqrt{t} \tag{1}$$

O método consiste na previsão da profundidade de carbonatação que atingirá a armadura, a partir do conhecimento de uma profundidade em um determinado tempo. Mesmo se tratando de um método simples, este não é aplicável a presente pesquisa, devido aos resultados encontrados nas análises. Para o edifício A, os resultados de profundidade no ano 8 foram iguais a zero. Ao colocar estes dados na equação resulta em um coeficiente k nulo, o que limita a resolução da previsão da profundidade. Já para os edifícios B e C os resultados de profundidade de carbonatação nos anos 10 e 7, respectivamente, correspondem a espessura de cobrimento, indicando que o fenômeno já atingiu as armaduras, e portanto, descarta a necessidade desta previsão.

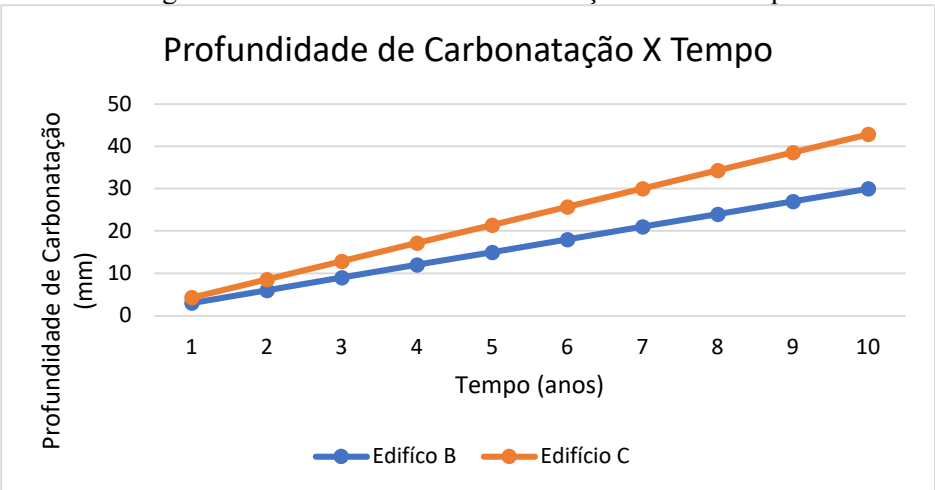
Mesmo assim, uma análise simples para entender a velocidade de propagação da profundidade de carbonatação pode ser feita, estabelecendo intervalos de tempo, como mostrado na Tabela 1. Com estes dados foi gerado o gráfico da Figura 4, onde é possível visualizar uma estimativa da propagação da carbonatação no interior do concreto ao longo dos anos.

Tabela 1 – Estimativa de profundidade de carbonatação ao longo do tempo

EDIFÍCIO	e (mm)	t (anos)	k	Tempo (anos)									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0	8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	30	10	6	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
C	30	7	8,6	4	9	13	17	21	26	30	34	39	43

Fonte: os autores.

Figura 4 – Profundidade de Carbonatação *versus* Tempo



Fonte: os autores.

A partir da análise do gráfico é possível perceber um crescimento de aproximadamente 5 mm ao ano na profundidade de carbonatação. Percebe-se que no edifício C, se considerado o cobrimento previsto em norma de 40 mm, a carbonatação atingiria a camada das armaduras somente após nove anos, tendo ainda dois anos de proteção quando comparado a situação real atual. Fazendo a mesma análise para o edifício B, constata-se a presença de carbonatação na profundidade de 40 mm somente após os 13 anos. Vale ressaltar que este método não leva em consideração características do meio em que a estrutura está inserida, bem como composição do concreto, dados estes que influenciam diretamente na carbonatação. Outra questão que deve ser levada em conta é o fato desta profundidade de carbonatação ir diminuindo sua agressividade com o tempo, ou seja, em determinado momento ela estacionará e não continuará a ingressar na estrutura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos dados coletados e analisados, pode-se estabelecer algumas considerações finais. O edifício A, mais próximo ao mar, apresentou dados satisfatórios em relação a carbonatação, não havendo detecção de CO_2. Em relação aos íons cloreto, sua presença atingiu a camada das armaduras, igual a 30mm, apresentando assim um risco a durabilidade e estabilidade da estrutura.

No edifício B foi constatada a presença de carbonatação na camada de 3 0mm, correspondente ao cobrimento, estando assim, despassivada. Os íons cloretos atingiram uma profundidade de 20 mm. Já o edifício C, mesmo estando a aproximadamente 400 metros da faixa de areia, apresentou valores altos de penetração de cloretos, iguais a 20 mm de profundidade. A carbonatação atingiu a camada das armaduras, e representa um risco de corrosão, tanto por sua agressividade isolada, quanto pelo ataque combinado aos íons cloretos.

A análise da simultaneidade dos ataques demonstrou que os íons cloretos podem influenciar positivamente na resistência ao ingresso de CO_2 na estrutura, evitando que o processo de carbonatação ocorra. Ao mesmo tempo que, a presença de carbonatação na estrutura pode levar a uma maior profundidade de penetração de cloretos, devido ao fato do processo de carbonatação empurrar os íons para o interior do concreto. Quanto aos modelos de previsão, sua utilização requer o conhecimento de diversas variáveis, muitas delas de difícil acesso, dificultando assim sua aplicação.

Em complemento, foi constatada influência de fatores relativos às características dos materiais empregados, como relação a/c, espessura de cobrimento, espessura e qualidade do revestimento, pintura e permeabilidade do concreto na resistência a penetração dos agentes agressivos. A coleta e análise de tais parâmetros seguem como sugestão de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. P. B. **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, RS, Brasil, 2019.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3600:** Concrete structures. Sydney: Standards Australia Limited, 2009.

BALESTRA, C. E. T.; REICHERT, T. A.; PANSERA, W. A.; SAVARIS, G. Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resistivity of field naturally degraded structures present in marine environment. **Construction and Building Materials,** v. 230, 2020.

BOLINA, F.; SCHNEIDER, D.; TUTIKIAN, B. Fundamentos da avaliação da probabilidade de corrosão nas estruturas de concreto armado inseridas em ambientes de alta agressividade. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções. **Anais [...].** Foz do Iguaçu, 2014.

COSTA, A; APPLETON, J. Concrete carbonation and chloride penetration in a marine environment. **Concrete Science and Engineering,** v. 3, p. 242-249, 2001.

DA SILVA, F. G.; HELENE, CASTRO-BORGES, P.; LIBORIO, J. B. L. Sources of Variations When Comparing Concrete Carbonation Results, **J. Mater. Civ. Eng.,** v. 21, n. 7, p. 333–342, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2**: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

FONSECA, C. R. L. **Determinação da profundidade de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata em estrutura de concreto: estudo de caso**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, Brasil, 2017.

GENTIL, V. **Corrosão.** 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GJØRV, Odd E. **Durability Design of Concrete Structures In Severe Environments.** Taylor & Francis: New York, 2009.

HAN, S.; PARK, W.; YANG, E. Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures. **Construction and Building Materials,** v. 48, p. 1045-1049, 2013.

HELENE, Paulo R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993.

LI, D.; CHEN, B.; SUN, H.; MEMON, S. A.; DENG, X.; WANG, Y.; XING, F. Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 73-81, 2018b.

LI, K.; ZHANG, Y.; WANG, S.; ZENG, J. (2018a). Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application. **Materials and Structures,** v. 51, n. 6, p. 1-15, 2018a.

LI, S.; YAN, J. Y.; WANG, X. G. **On comparison between reinforcement electricity accelerated corrosion and natural corrosion of concrete.** Applied Mechanics and Materials (Vol. 357, pp. 676-679). Trans Tech Publications Ltd., 2013.

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y.; MA, Y. Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research,** v. 95, p. 217–225, 2017.

MALHEIRO, R. L. M. C.; FERREIRA, R. M.; CAMÕES, A.; RIBEIRO, B. Análise de sensibilidade dos parâmetros de um modelo para previsão da profundidade de carbonatação e sua aplicação em estruturas reais. In: IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas – CINPAR. **Anais [...].** João Pessoa, PB, 2013.

MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; RÉUS, G. C.; HELENE, P. Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, heigth and positioning in relation to the sea shore. **Construction and Building Materials**, 44, 452-457, 2013.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2014.

OUGLOVA, A.; BERTHAUD, Y.; FRANÇOIS, M.; FOCT, F. Mechanical properties of an iron oxide formed by corrosion in reinforced concrete structures. **Corrosion science,** 48, 2006.

PAUL, S. C.; PANDA, B.; HUANG, Y.; GARG, A.; PENG, X. An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete. **Measurement**, v. 124, p. 205-210, 2018.

ROMANO F. S. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil, 2009.

SADOWSKI, L. **Methodology for assessing the probability of corrosion in concrete structures on the basis of half-cell potencial and concrete resistivity measurements. Institute of Building Engeneering.** Wroclaw University of Technology: Wroclaw, 2013.

SHEN, X. H.; JIANG, W. Q.; HOU, D.; HU, Z.; YANG, J.; LIU, Q. F. Numerical study of carbonation and its effect on chloride binding in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, 2019.

SILVA, M.; MADEIROS, J.; CAVALCANTE, L.; GOMES, G.; CAVALCANTE, F.; MOTA, L.; MESQUITA, E. **Avanço da carbonatação em concretos para idades iniciais**. In: II Simpósio Brasileiro sobre reabilitação das construções. **Anais [...]**. Fortaleza, Ceará, 2019.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete**. Stockholm: Cement and Concrete Research Institute, 1982. 468 p.

VAN ZIJL, G. P. A. G.; PAUL, S. C. A novel link of the time scale in accelerated chloride-induced corrosion test in reinforced SHCC. **Construction and Building Materials,** v. 167, p. 15-19, 2018.

WANG, Y.; NANUKUTTAN, S.; BAI, Y.; BASHEER, P. A. M. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. **Construction and Building Materials,** v. 140, p. 173-183, 2017.

WEATHER SPARK. Condições Meteorológicas Médias de Capão da Canoa. 2021. Disponível em: https://pt.weatherspark.com/y/29801/clima-caracter%c3%adstico-em-cap%c3%a3o-da-canoa-brasil-durante-o-ano. Acesso em: 01 jun. 2021.

YE, H.; JIN, X.; FU, C.; JIN, N.; XU, Y.; HUANG, T. Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 457-463, 2016.

YOON, I. S. Deterioration of Concrete Due to Combined Reaction of Carbonation and Chloride Penetration: Experimental Study**. Key Engineering Materials**, v. 348-349, p. 729–732, 2007.