FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CURITIBA – FATEC-PR
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO ADAMCESKI FRETOLA

CARBONATAÇÃO E ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE PREVISÃO

CURITIBA
2020

RODRIGO ADAMCESKI FRETOLA

CARBONATAÇÃO E ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE PREVISÃO

Trabalho apresentado na disciplina de Projeto de Graduação II do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Tecnologia de Curitiba – FATEC-PR, como requisito parcial obrigatório para aprovação.

Orientadora: Prof.ª Me. Alessandra Monique Weber Abdalla
Coordenador do Curso: Prof. Esp. Isaac Aguiar Oliveira

CURITIBA
2020

Á Deus

Agradecimentos

À minha amada Esposa Priscila, pela ajuda, companheirismo e, principalmente, por entrar na minha vida e modificar toda a minha existência.

Aos meus pais, Bento e Natalia, por absolutamente tudo, sem restrições. Tudo o que eu sou hoje eu devo a vocês.

À minha professora e orientadora Alessandra Monique weber, com sua capacidade técnica e extrema clareza, soube conduzir o este trabalho de uma maneira lúcida e consistente fazendo jus ao título de *Mestre e Orientadora*.

A meu filho Bernardo e minha filha Maria Luiza, que me deram luz e fé para alcançar meu objetivo.

E a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização do presente trabalho.

Agradeço a Deus por ter me fortalecido ao ponto de superar as dificuldades e também por toda saúde que me deu e que permitiu alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

RESUMO

A carbonatação é um processo físico-químico que ocorre através da reação do gás carbônico presente no ambiente e os compostos químicos do concreto, que por sua vez reduz seu pH, deixando a armadura suscetível ao processo de oxidação, o que impacta na durabilidade das estruturas em concreto armado. Diante desta realidade foram relacionados os diversos fatores que favorecem a carbonatação, como a qualidade de execução do concreto, o correto adensamento, a concentração do gás carbônico no ambiente em que a edificação se encontra e entre outros. Para tanto existem diversos modelos matemáticos presentes na literatura idealizados por diversos estudiosos do assunto, capazes de estimar a vida útil de uma estrutura. Deste modo o presente estudo tem como por objetivo analisar e relacionar, os dados obtidos de um ensaio destrutivo aplicado a uma estrutura de concreto armado, abandonada, favorável ao processo de carbonatação natural cuja idade é de 15 anos, com os dados resultantes dos modelos matemáticos propostos por Ekolu (2018) e Possan (2010) selecionados para o estudo. Os resultados do ensaio realizados com fenolftaleína, demostraram claramente a influência de alguns fatores que favorecem o avanço da frente de carbonatação e demostraram a importância da correta execução de uma estrutura em concreto armado.

Palavras-chave: carbonatação; concreto; modelos matemáticos.

ABSTRACT

Carbonation is a physical chemical process that occurs through the reaction of carbon dioxide present in the environment and chemical compounds in concrete, which in turn reduces its pH, leaving the armature susceptible to the oxidation process, which impacts on the durability of the structures in reinforced concrete. In view of this reality, the various factors that favor carbonation were listed, such as the quality of concrete execution, the correct density, the concentration of carbon dioxide in the environment in which the building is located, among others. For that, there are several mathematical models present in the literature idealized by several scholars of the subject, able to estimate the useful life of a structure. Thus, the present study aims to analyze and relate the data obtained from a planned destructive test to a concrete structure, abandoned, favorable to the natural carbonation process whose age is 15 years, with the data provided from the proposed mathematical models. by Ekolu (2018) and Possan (2010) selected for the study. The results of the test carried out with phenolphthalein, clearly demonstrated the influence of some factors that favor the advance of the carbonation front and demonstrated the importance of the correct execution of a reinforced concrete structure.

Keywords: *Carbonation. Concrete. Mathematical models.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de cura e exposição k 1 x k 2. 27
Tabela 2- Valores do fator idade “n” em função da exposição. 28
Tabela 3 – Coeficientes do modelo por tipo de cimento.....29
Tabela 4– Coeficiente g do modelo em função das condições de exposição 30
Tabela 5 – Valores de pontos de análise 37
Tabela 6 – Valores mensais e médios e média anual de RH do ano 2019 de Colombo - PR.....38
Tabela 7 – Coeficientes para a equação de *eco*. 39
Tabela 8 – Coeficientes para a equação de 30. 39
Tabela 9 – Coeficiente g. 40
Tabela 10 – Tabela comparativa de dados reais com valores de modelos matemáticos. 42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista frontal da estrutura. 32
Figura 2 - Vista interna da estrutura. 32
Figura 3 - Local indicado da remoção da amostra. 33
Figura 4 - Foto da amostra. 34
Figura 5 - Indicação do corte e foto da seção realizada. 34
Figura 6: Fotos da trinca longitudinal. 35
Figura 7: Foto parte inferior viga. 36
Figura 8:Pontos de análise. 36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 OBJETIVO GERAL 12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12
2 JUSTIFICATIVA 13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
3.1 A CARBONATAÇÃO 14
3.2 VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO 16
3.2.1 Relação água/cimento 16
3.2.2 Concentração de CO_2 17
3.2.3 Qualidade da execução do concreto 18
3.2.4 Umidade relativa do ar 18
3.2.5 Temperatura 18
3.2.6 Efeitos do tipo de cimento 19
3.2.7 Fissuras nas estruturas 19
3.3 PELÍCULA PASSIVADORA 19
3.4 PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS EM CONCRETO 20
3.4.1 TUUTTI (1982) 20
3.4.2 SENTLER (1984) 22
3.4.3 PARROT (1987) 23
3.4.4 BAKKER (1988) 24
3.4.5 SCHIESSL (1988) 25
3.4.6 CEB (1996) 27
3.4.7 EKOLU (2018) 28
3.4.8 POSSAN (2010) 28
4 METODOLOGIA 30
4.1 MODELOS MATEMÁTICOS 30
4.1.1 Modelo De Ekolu 30
4.1.2 Modelo de Possan 31
4.2 PROJETO EXPERIMENTAL 31
4.2.1 Descrição da estrutura em estudo 31
4.2.2 Detalhamento do ensaio 32

5 RESULTADOS DO ENSAIO.....35

5.1 INFLUÊNCIAS DE FISSURAS.....35

5.2 INFLUÊNCIA DO ADENSAMENTO CORRETO.....35

5.3 PROFUNDIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO.....36

6 APLICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS.....37

6.1 MODELO MATEMÁTICO DE EKOLU (2018).....37

6.2 MODELO MATEMÁTICO DE POSSAN.....40

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....42

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....43

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem se observado o crescente número de estruturas em concreto armado com manifestações patológicas, principalmente com problemas de corrosão de armaduras (HELENE 1997).

Segundo HELENE (1997) a perda da proteção natural oferecida à armadura pelo cobrimento de concreto pode ocorrer através de diversos mecanismos sendo preponderantes a despassivação por carbonatação.

A corrosão das armaduras apresenta-se como a manifestação patológica com o maior índice de ocorrência em estruturas de concreto armado (ANDRADE, 2014; ANDRADE et al., 2017; KARI et al., 2014; POSSAN TAFFESE et al., 2013,). No Brasil, por exemplo, este índice varia de 14 a 64% a depender da região do país em análise (ANDRADE, 1992; ARANHA 1994; DAL MOLIN, 1988).

A carbonatação acontece naturalmente em estruturas de concreto expostas à ação do dióxido de carbono, este difunde na superfície do concreto e, em presença da umidade dos poros, forma a frente de carbonatação (CARMONA 2005).

Segundo Ferreira (2013) a carbonatação se caracteriza pela formação de uma frente homogênea de avanço, que promove a formação de zonas de pH distintos, de modo que quando a frente de pH mais baixo formada atinge a região da superfície do aço ocorre um ataque à película passivadora da armadura, deixando este material suscetível à corrosão.

Diante desta patologia, surgiram diversos modelos matemáticos a fim de prever a profundidade da frente de carbonatação, tentando prever uma vida de estruturas de concreto armado, modelos que são baseados nas características dos aglomerantes, na relação agua e cimento, no meio em que a peça será exposta e também seu tempo de exposição.

Neste contexto, este estudo irá se desenvolver analisando todos os fatores que favorecem este fenômeno, realizar um estudo em campo, determinar em uma estrutura com mais de 15 anos a profundidade de sua frente de carbonatação e comparar os resultados obtidos com os modelos matemáticos de previsão, logo verificando sua eficácia.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a eficácia de modelos matemáticos de previsão de profundidade da frente de carbonatação com estudo caso.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudar as variáveis que influem na carbonatação do concreto;

2. Executar um ensaio in loco em uma estrutura antiga de concreto armado, verificando a profundidade da frente de carbonatação.

3. Comparar modelos matemáticos existentes na literatura com resultados obtidos do ensaio.

2 JUSTIFICATIVA

Uma das maiores dificuldades enfrentadas pela engenharia civil está relacionada às patologias, que por sua vez, acabam por degradar e reduzir a vida útil de uma edificação, ocasionando grandes prejuízos estéticos, financeiros ou até mesmo irreversíveis.

Grande parte dos estudos realizados sobre vida útil do concreto armado acaba sendo direcionada a carbonatação, situação em que se estudam corpos de prova em laboratórios através de simulações aceleradas do processo de carbonatação em condições que favorecem sua formação.

Segundo Helene (1992) a manifestação patológica de maior incidência em estruturas de concreto tem sido a corrosão de armaduras, isso devido à carbonatação do concreto, de acordo com Silva (2007) esta manifestação patológica corresponde a 30% das anomalias existentes.

Segundo Silva (2007) um dos fatores que contribui para a existência da corrosão é a carbonatação, que reduz o pH do concreto e despassiva a armadura. Esta, quando despassivada e na presença de umidade, desencadeia o processo de corrosão, comprometendo a segurança e a durabilidade da estrutura.

Segundo Ferreira (2013), o fenômeno da carbonatação, consiste em um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera e os compostos da pasta de cimento, que tem como resultado principal a precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Na estrutura interna do concreto em que essa precipitação ocorre, o concreto se altera fisicamente e, também, do ponto de vista químico, há uma redução da alcalinidade.

A frente de carbonatação vem se formando de fora para dentro, isto é, forma-se na superfície do concreto e avança para o interior da peça que pode ser verificada com espessuras de milímetros a centímetros na peça.

Tendo em vista a prevenção desta patologia, existem diversos estudos que tem como objetivo desenvolver métodos para estimar a profundidade dessa frente de carbonatação. Estes métodos se distinguem pela sua formulação que aplicam parâmetros do simples ao mais complexo, analisando diversos fatores, para assim chegar a um modelo ideal.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A degradação de estruturas em concreto armado é alvo de muitos estudos pelo mundo, em razão dos altos custos gerados para a recuperação, segundo Frangopol e Estes (1997) as 600.000 pontes rodoviárias existentes nos Estados Unidos geram anualmente despesas em torno de 5 bilhões de dólares e segundo Nilson (1994) a Suécia com suas 9.500 pontes tem onerados de seus cofres anualmente valores próximos á 55 milhões de dólares.

Sabe-se que são muitas as causas de deterioração das estruturas de concreto armado: corrosão de armaduras, lixiviação, ataque por sulfatos, reação álcali-agregado, entre outras, deste modo ás manifestações patológicas podem comprometer a durabilidade destas estruturas reduzindo, de forma significativa, sua vida útil.

As armaduras das estruturas de concreto armado em sua procedência, se encontram passivas em decorrência da elevada alcalinidade do extrato aquoso do concreto, que possui um pH da ordem de 12 a 13 (HELENE, 1981).

A carbonatação no concreto que é um dos principais agentes iniciadores da corrosão, provoca alteração na condição de equilíbrio da alta alcalinidade, havendo assim, redução generalizada do pH ocasionando a susceptibilidade das armaduras (quebra da instabilidade química do filme de óxidos passivante) no que tange a corrosão das armaduras (HELENE ,1981; PAGE, 1988; PARROT,1990).

3.1 A CARBONATAÇÃO

A carbonatação é um processo físico químico que ocorre através das superfícies expostas do concreto, através da difusão do gás carbônico (CO_2) pelos poros e fissuras do concreto, que por sua vez reage com o hidróxido de cálcio $C_a(OH)_2$ (que é um dos produtos resultantes da hidratação do cimento Portland), resultando na formação do carbonato de cálcio (C_aCO_3) e água (H_2O). (ANDRADE, 2001).

Segundo Helene (1993) outros gases ácidos como o dióxido de enxofre, e o gás sulfídrico, também podem contribuir a redução do pH do concreto. Também é importante salientar, que a carbonatação pode influenciar na liberação de cloretos

fixados na mistura água cimento, assim aumentando as probabilidades do inicio do processo de corrosão.

A reação do gás carbônico com os compostos do cimento chamada de carbonatação ocorre lentamente, segundo a reação principal a seguir:

$$C_a(OH)_2 + CO_2 \rightarrow C_aCO_3 + H_2O$$

A carbonatação não causa a degradação no concreto simples (sem armadura), até pelo contrário, peças de concreto carbonatadas são mais resistentes e apresentam uma impermeabilidade maior à absorção de agentes agressivos. Neville (1997) afirma que a liberação da água resultante da carbonatação, ajuda na hidratação da pasta de cimento, resultando em uma redução da permeabilidade do concreto elevando a dureza superficial, e deste modo tendo uma menor movimentação de umidade.

O problema ocorre com a redução da alcalinidade do concreto que envolve as armaduras, o pH de precipitação do carbonato de cálcio tem valores em torno de 8 a 9 em temperatura ambiente, que reduz as condições de estabilidade química da película-passivadora do aço (HELENE, 1993).

Segundo Cascudo (1997), uma característica do processo de carbonatação é a existência de uma frente de avanço do processo, que separa duas zonas com pH muito diferentes: uma com pH menor que 9,0 (carbonatada) e outra com pH maior que 12,5 (não carbonatada). Essa frente é chamada de frente de carbonatação, frente que deve ser mensurada com relação ao cobrimento.

Segundo Helene (1993) a penetração do gás carbônico no concreto ocorre preponderantemente por um mecanismo de difusão, sistemas de capilaridades e migração de íons não são considerados nesta situação, já a pressão, por sua vez, não entra em questão por não haverem gradientes significativos para que se justifique um mecanismo de penetração. Portanto, em grande maioria das ocorrências, trata-se de gradientes de concentração de gás carbônico.

A absorção do gás carbônico dependerá de sua concentração no ambiente em que a estrutura se encontra, sendo influenciada pela quantidade de água nos poros do concreto, caso esteja muito saturada, a penetração do CO_2 não ocorrerá, em contraponto, se a peça estiver muito seca, a reação química da carbonatação não ocorrerá.

Schiessl (1990) diante de suas atividades experimentais observou que o processo de absorção de água no concreto é mais rápido do que o processo de secagem. Como resultado desta observação, o autor pode verificar que em concreto em ambientes externos que passam por esse processo de umidificação e secagem, logo ficam mais tempo úmidos, resultando em uma taxa de absorção de gás carbônico menor.

3.2 VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO

Segundo Ferreira (2013) a composição do cimento e a execução do concreto tem relação direta com o início do processo de carbonatação, e são fatores de grande influência quando se fala em profundidade e velocidade deste processo.

Cascudo (1997) ainda afirma que a absorção do gás carbônico no concreto depende de diversos fatores, tais como adensamento, processo de cura, tipo de cimento, concentração do CO_2 e a umidade do ambiente, e ainda a relação água/cimento.

3.2.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento é um fator de grande influência na profundidade de carbonatação, pois ela determina a porosidade e a permeabilidade do concreto.

Esta relação rege todas as características ligadas à microestrutura do concreto endurecido produzindo resultados significativos na dimensão dos poros e capilaridades do concreto endurecido (HELENE, 1993).

Uma relação muito presente na literatura é a carbonatação em função da resistência do concreto, uma simplificação que pode ser inadequada. Esta relação entre porosidade e resistência acaba sendo imprópria quando, considera-se a resistência obtida em ensaios de amostras curadas seguindo um procedimento padrão, totalmente diferente da cura em obra (NEVILLE, 1997).

Nunes (1998) e Helene (1993) afirmam em seus trabalhos para condições ambientais e de cura constantes, os parâmetros que controlam a carbonatação são a qualidade da pasta, que é função da relação água/cimento e a quantidade de óxido de cálcio presente no cimento.

3.2.2 Concentração de CO_2

A carbonatação do concreto é um fenômeno regido pela absorção do gás carbônico presente no ambiente cuja estrutura em concreto esteja exposta. Diante deste fato, considera-se que a concentração de CO_2 é um forte influenciador da frente de carbonatação.

Segundo Hellene (1993), Yoon (2007) Uomoto e Takada (1993), Saetta e Vitaliani (2004) Neville (1997) e outros autores, quanto maior a concentração do gás carbônico no ambiente maior a profundidade carbonatada.

Uomoto e Takada (1993), verificando a influência do teor de CO_2 no avanço da frente de carbonatação, submeteram corpos de prova em concreto com relações água/cimento distintas (0,50, 0,60 e 0,70) a concentrações de CO_2 de 0,07% (valor considerado para um ambiente natural interno), 1% e 10% (para condição de teste acelerado), com temperatura e umidade controladas (T=20°C e UR=55%). Para a mistura com água/aglomerante 0,50, o efeito da variação do teor de CO2 na profundidade carbonatada foi reduzido, especialmente para concretos submetidos à cura. Yoon (2007) também relata um acréscimo na profundidade carbonatada quando o teor de CO_2 é aumentado.

Saetta e Vitaliani (2004) destacam a concentração de CO_2 do ambiente de exposição como um parâmetro ambiental importante para o estudo da carbonatação do concreto, apresentando dados de concentrações usuais deste gás de 0,015% para campo aberto, 0,036% para centros urbanos e 0,045% para centros industriais.

Segundo Neville (1997) a ação do CO_2 ocorre mesmo em ambientes onde a concentração desse gás na atmosfera é muito baixa, como é o caso de ambientes rurais, onde o teor de CO_2 é aproximadamente de 0,03. O autor faz referência a concentrações típicas de outros ambientes como, por exemplo, em ambiente de laboratório não ventilado, cujo teor de CO_2 pode superar 0,1%. Em grandes cidades, pode-se chegar até 0,3%, sendo que em alguns casos excepcionais pode-se atingir 1%.

Observa-se que vários autores obtiveram diversos resultados de concentração, que dependem do local, com seus fatores, como vegetação, concentração de veículos, indústrias, entre outros, mas em média os valores variam entre 0,03% a 1%.

3.2.3 Qualidade da execução do concreto

A compactação e a cura são dois fatores de grande influência no processo de carbonatação. O avanço da carbonatação pode ser facilitado quando se faz uma compactação ineficiente, que pode gerar falhas como ninhos de concretagem e aumento da porosidade. Deste modo, ocorre uma maior facilidade de absorção dos agentes agressivos que propiciam a carbonatação (ISAIA, 1999).

Cadore (2008) realizou um estudo e observou que, quando se acrescentam 2 dias no período de cura, ou seja, de 1 para 3 dias, se consegue uma elevação no desempenho de proteção em relação à frente de carbonatação em 10% para concretos com teor de cimento de 300 kg/m³, e 50% para concretos com teor de cimento de 420 kg/m³.

Portanto, o processo de cura e o adensamento tem influência direta com a carbonatação, pelo fato de que afetam diretamente a microestrutura do concreto, influenciando a difusão do gás carbônico por meio dos poros.

3.2.4 Umidade relativa do ar

Tasca (2012) diz em seus estudos que, a umidade do concreto, é um fator determinante no processo de carbonatação, não podendo estar muito alta, o que impede a absorção do gás carbônico, nem muito baixa, o que dificulta a reação química do CO_2.

Segundo Bakker (1988) a saturação parcial de umidade dos poros do concreto, eleva ao valor máximo as probabilidades da ocorrência do processo químico da carbonatação. Parrot, 1987; Isaia, 1999 ainda completam dizendo que a faixa de umidade favorável ao processo de reação está entre 50% e 80%.

3.2.5 Temperatura

De acordo com Callister (2002), a temperatura tem influência direta com a velocidade das reações químicas, podendo ser expressa pela lei de Arrhenius. Papadakis (1991) ainda afirma que quando a temperatura oscila entre 20 e 45ºC ocorre uma aceleração do avanço da frente de carbonatação.

3.2.6 Efeitos do tipo de cimento

Neville (1997) e Parrot (1987) ressaltam que a carbonatação do concreto tende a desacelerar no tempo, segundo uma curva exponencial. Inicialmente, a profundidade de carbonatação aumenta com grande rapidez, prosseguindo mais lentamente e tendendo a uma profundidade máxima. Bakker (1988) coloca que a rede de poros que se modifica ao longo do tempo, em função da precipitação dos carbonatos, forma uma barreira física, limitando a velocidade de carbonatação do concreto.

Com relação ao tipo de cimento, concretos produzidos com adições de pozolânicas, apesar de propiciarem o refinamento dos poros e dos grãos, apresentam profundidades de carbonatação superiores às de cimento portland comum Kulakouwski (2002), Isso ocorre, pois prepondera o efeito da diminuição do teor de produtos carbonatados devido à redução do teor de álcalis quando a sílica reage com o óxido de cálcio pela reação pozolânica. Isso resulta em duas frentes de carbonatação mais velozes para os concretos com adições.

3.2.7 Fissuras nas estruturas

Tuutti (1982) analisando os seus estudos e de diversos pesquisadores, concluiu que, embora a carbonatação atinja rapidamente as armaduras, em razão das fissuras, os produtos da corrosão vedam a fissura e ocorre um complexo fenômeno de realcalinização, desde que não ocorram movimentações estruturais consideráveis.

3.3 Película Passivadora

A proteção mais importante das armaduras do concreto armado se dá através da elevada alcalinidade de seu meio, onde os níveis de pH variam entre 12 e 13, o que o torna capaz de proporcionar um meio favorável as reações químicas de passivação do aço.

Pan e Lu (2011) e Al et al. (2016) através de ensaios como espectroscopia de fotoelétrons excitados por Raios-X (XPS) e difração de Raios-X (DRX), conseguiram identificar a morfologia da película passivadora formada em barras de aço sob

ambientes distintos, sendo composta por camadas mais finas, mais internas ou externas em relação à barra de aço.

Ghods et al. (2009) e Poursaee (2010) observaram a melhora na integridade da camada passivadora com o aumento do pH de solução na qual se imergiu o aço, e também verificaram que isso não altera em nada a composição química da película.

3.4 PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS EM CONCRETO

Conforme apresentado, existe um grande esforço no sentido de se tentar correlacionar os diversos fatores que influenciam na previsão da vida útil das estruturas de concreto (REPETTE, 1997).

Com base no presente estudo e a partir da necessidade mundial em prever a vida útil das estruturas em concreto, surgiram os modelos matemáticos, que tem por objetivo, através de estudos e experimentos relacionar os fatores que influem na carbonatação do concreto, a fim de prever a sua profundidade.

Pode-se, observar muitos modelos matemáticos descritos na literatura, cujos muitos destes estudados por pesquisadores e abordados em teses e dissertações. A seguir serão abordados alguns modelos propostos.

3.4.1 TUUTTI (1982)

Este apresenta-se como um dos mais utilizados, segundo Carmona (2005), o modelo de Tuutti é “uma particularização do cálculo de difusão com fronteiras móveis equacionado por Crank (1975)”, como podemos ver a seguir:

$$\frac{c_x - c_1}{g\left(\frac{k_{co2}}{2}\sqrt{D_{CO2}}\right)} + C_X - C_2 = 0 \quad (1)$$

$$g\left(\frac{k_{co2}}{2}\sqrt{D_{CO2}}\right) = \sqrt{\pi} * \frac{k_{co2}}{2\sqrt{D_{CO2}}}\, e\, \frac{k_{co2}}{D_{CO2}} erf \frac{k_{co2}}{2\sqrt{D_{CO2}}} \quad (2)$$

$$e = k_{co2}\sqrt{t} \quad (3)$$

Onde:

C_x = Concentração de CO_2 na descontinuidade (kg/m³);

C_1 = Concentração de CO_2 no ar (kg/m³);

C_2 = Concentração de gás carbônico no material (kg/m ^{3});

k_{CO2} = Coeficiente de carbonatação ($m/s^{1/2}$);

D_{CO2} = Coeficiente de difusão do CO_2;

X = Profundidade de carbonatação (m);

t = tempo (s);

Para aplicar esse modelo Tuuti supõe que o coeficiente de difusão efetivo do CO_2 é igual ao do O_2 por ser de mais fácil determinação em laboratório.

Para se conhecer o coeficiente K_{CO2}, Tuutti aplica a equação abaixo:

$$\frac{cx-c1}{C2-cx} = \frac{cs}{a} \quad (4)$$

Onde:

CS = Concentração de CO_2 no ar (kg/m³);

a = Teor de CaO em 1m³ de concreto (kg/m³), calculado pela seguinte equação:

$$a = c.\frac{\%CaO}{100}.\frac{GH}{100}.\frac{MCO_2}{MCaO} \quad (5)$$

Onde:

a = Teor de CaO em 1m³ de concreto (kg/m³);

C = Consumo de cimento (kg/m³);

%CaO = Teor de CaO no cimento (%);

GH = Grau de hidratação, sendo 60% para a/c = 0,4, 70% para a/c = 0,6, 80% e para a/c = 0,8;

MCO_2 = Massa molar do CO_2 (kg);

MCaO = Massa molar do CaO (kg);

Segundo Valença (2016) mesmo sendo muito utilizado hoje em dia, existem muitas críticas em torno desse modelo. Helene (1993) afirma que este, expressa bem a realidade caso a exposição da estrutura se der em ambientes internos, visto que as condições ambientais quase não se alteram. Porém, para ambientes externos, esse modelo apresenta valores de profundidades de carbonatação inferiores aos calculados, devido à variação constante das condições ambientais (POSSAN, 2004).

Segundo Valença (2016) mesmo tendo algumas críticas o modelo de TUUTTI (1982) foi utilizado como base para diversos modelos matemáticos após sua concepção, e ainda é largamente utilizado em estudos relacionados a cálculos de carbonatação.

3.4.2 SENTLER (1984)

Sentler propôs o seguinte modelo, que determina a profundidade média de carbonatação:

$$e = \sqrt{\left(\frac{2.D_{c02}}{a}\right).dp.t} \quad (6)$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação (m);
D_{c02} = coeficiente de difusão do CO_2 (m^2/s);
a = Concentração dos constituintes do concreto que podem carbonatar (kg/m^3);
dp = Diferença parcial de pressão do CO_2 (kg/m^3);
t = Tempo (s);

Segundo o autor a carbonatação pode ser expressa de maneira estocástica, como na equação a seguir:

$$f = (e, e_0; t) = \left[\frac{1}{\sigma(2.\pi.t^{0,5})^{0,5}}\right]^{\frac{(e-e_O-\mu.t^{0,5})^2}{2.\sigma^2.t^{0,5}}} \quad (7)$$

Onde:

f = Função de densidade normal com média $e_o - \mu . t^{0,5}$ e variância $\sigma^2 . t^{0,5}$;
e_0 = valor inicial da profundidade da carbonatação;

3.4.3 PARROT (1987)

O modelo proposto para determinação da profundidade da frente de carbonatação e dado pelas seguintes equações:

$$e = \frac{ak^{0,4}\, t_i^{\,n}}{CaO^{0,5}} \quad (8)$$

$$k = mk_{60} \quad (9)$$

$$n = 0{,}02536 + 0{,}01785\,.UR - 0{,}0001623\,UR^2 \quad (10)$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação (m);
a = Fator empírico que toma o valor aproximado de 0,64;
k_{60} = Permeabilidade do concreto para UR = 60% (m²);
t = tempo (s);
CaO = Conteúdo de CaO no concreto (kg/m³);
UR = umidade relativa do ar (%);
n = Fator do tempo em função da umidade relativa;

O autor propôs uma redução dos valores do expoente do tempo em função da umidade, cujos valores para umidades em torno de 60 a 70% o modelo proporciona valores da potência do tempo aproximadamente iguais a 0,5 enquanto que para umidades de 70% até próxima de 100% esse fator é reduzido até 0,18.

3.4.4 BAKKER (1988)

O autor desconsidera o processo de carbonatação quando concreto estiver úmido, logo, a mistura cimentícia terá que estar seca para que ocorra o processo em questão.

Diante do fato que desconsidera a carbonatação quando concreto está úmido ele propõe a frente de evaporação e a profundidade seca que são dadas por:

$$y = B\sqrt{t} \tag{11}$$

$$B = \sqrt{\frac{2D_V}{b}(C_3 - C_{4)}} \tag{12}$$

$$b = w - 0{,}25.C - GH\,.D_{gel} - w\,.GH\,.D_{cap} \tag{13}$$

Onde:

y = Profundidade seca (m);
D_V = Coeficiente de difusão de vapor de água (m²/s);
b = Quantidade de água evaporada do concreto (kg);
C_3 = Umidade da frente de evaporação (kg/m³);
C_4 = Umidade do ar (kg/m³);
w = Quantidade total de água do traço (kg/m³);
C = Consumo de cimento (kg/m³);
GH = Grau de hidratação do cimento;
D_{gel} = Água de gel (kg/m³);
D_{cap} = Água dos poros capilares (kg/m³);

A equação global que representa a velocidade de carbonatação proposta é a seguinte:

$$e = A\sqrt{t_1} + A\sqrt{t_2 - \left(\frac{e_1}{B}\right)} + A\sqrt{t_N - \left(\frac{e_1 - 1}{B}\right)^2} \tag{14}$$

$$A = \sqrt{\frac{2D_{C02}}{a}(c_S - c_2)} \quad (15)$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação no tempo t (m);
e_n = Profundidade de carbonatação no tempo Tn (m);
D_{c02} = Coeficiente de difusão do vapor de água (m²/s);
D_V = Coeficiente de difusão de vapor de água (m²/s);
a = Quantidade de compostos alcalinos do concreto (kg/m³);
C_s = Concentração de CO2 no ar (kg/m³);
C_2 = Concentração de CO2 na frente de carbonatação (kg/m³);
C_3 = Umidade da frente de evaporação (kg/m³);
C_4 = Umidade do ar (kg/m³);
b = Quantidade de água evaporada do concreto (kg);

Para situações em que o concreto não passe pelos ciclos de molhagem e secagem a equação se resume em:

$$e = A\sqrt{t} \quad (16)$$

3.4.5 SCHIESSL (1988)

Quantidade de gás carbônico que para por uma determinada seção de concreto é dada pela seguinte equação:

$$d_q = D_{co2} - 90.F\frac{c_1 - c_2}{e}\,dt \quad (17)$$

Onde:

d_q = Quantidade de CO2 difundida (kg);
$D_{co2} - 90$ = Coeficiente de difusão do CO_2 há 90 dias (m²/s);
F = Seção transversa (m²);

$c_1 - c_2$ = Diferença de concentração de CO_2 entre o ar e a frente de carbonatação (kg/m³);

e = Profundidade de penetração (m);
t = tempo (s);

A equação a seguir demonstra a quantidade de gás carbônico necessária para neutralizar os componentes alcalinos do concreto:

$$d_q = a\ dV \tag{18}$$

Onde:

d_q = Quantidade de CO2 difundida (kg/m³);
dv = Volume de Concreto (m³);

Substituindo a equação 18 na equação 17 tem se:

$$D_{co2} - 90.F\frac{c_1 - c_2}{e}\ dt = a\ dV = a\ F\ dx \tag{19}$$

O autor introduziu o fator “f” que se refere à diminuição do valor de D_{CO2} com a profundidade e um fator de retardamento da carbonatação “b”. Deste modo, à partir do coeficiente de difusão obtido aos 90 dias, D_{CO2}-90, se tem:

$$dq = D_{co2} - 90\ (1 - f.x) f_D \frac{c1 - c2}{x} dt \tag{20}$$

$$d_{qa} = a\ F_D\ dx \tag{21}$$

$$d_{qb} = b\ F_D\ dt \tag{22}$$

3.4.6 CEB (1996)

Seu modelo apresentando é o seguinte:

$$e = k_{c02} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \cdot \sqrt{t} \quad (23)$$

$$\mathrm{k_{c02}} = \sqrt{\frac{2.\mathrm{D_{c02}}.\mathrm{C_s}.\mathrm{k_1}.\mathrm{k_2}}{\mathrm{a}}} \quad (24)$$

$$\mathrm{D_{c02}} = 10 - \left(7 + 0{,}025\,\frac{\mathrm{fck}}{10}\right) \quad (25)$$

Onde:

e = Profundidade de carbonatação (m);
D_{C02}= Coeficiente de CO_2 no concreto carbonatado (m^2/s);
C_s = Concetração de CO_2 no ar (kg/m^3);
a = Teor de CaO em 1 m^3 de concreto (kg/m^3);
t = Tempo (s);
t_0 = Tempo de cura;
n = fator de idade;
K_1 . K_2 = Coeficientes de cura e exposição;
K_{co2} = coeficiente de carbonatação ($m/s^{1/2}$);

Para a relação de $\frac{C_s}{a}$ pode-se adotar o valor de $7\ x\ 10^{-6}$ quando se trata de cimento portland em ambientes convencionais.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de cura e exposição k 1 x k 2.

TIPO DE EXPOSIÇÃO	CURA	$k_1\ x\ k_2$
INTERIOR	Boa	1,0
INTERIOR	Má	2,0
EXTERIOR	Boa	0,5

Fonte: CEB, 1996.

Tabela 2- Valores do fator idade “n” em função da exposição.

TIPO DE EXPOSIÇÃO	N
INTERIOR	0,0
EXTERIOR PROTEGIDA	0,1
EXTERIOR NÃO PROTEGIDA	0,4

Fonte: CEB, 1996.

3.4.7 EKOLU (2018)

O modelo de Ekolu (2018) é apresentado pela equação a seguir:

$$y = e_h . e_s . e_{co} . cem . F_{c(t)^g} . \sqrt{t} \quad (26)$$

Onde:

y = Profundidade carbonatada (mm);
e_h = É o coeficiente relacional referente à umidade relativa;
e_s = Corresponde ao coeficiente relacional referente à resistência à compressão do concreto cem = Corresponde ao fator dependente do tipo de cimento (cujo valor é 1000 para todos os casos);
e_{co} = É o coeficiente relacional referente à concentração de CO_2 no ambiente;
$F_{c(t)}$ = Representa a função de crescimento da resistência do concreto;
t = é o tempo de exposição do concreto (anos);
g = é o fator dependente do tipo de cimento;

3.4.8 POSSAN (2010)

O modelo de Possan é expresso pela equação a seguir:

$$y = k_c . \left(\frac{20}{fc}\right)^{kfe} \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} . \left\{ exp\left[\left(\frac{k_{ad} . ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c}\right) + \left(\frac{k_{co_2} . CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c}\right) - \left(\frac{k_{UR} . (UR.058)^2}{100 + f_c}\right) \right] \right\} . k_{ce} \quad (27)$$

Onde:

y = Profundidade de carbonatação média do concreto (mm);
fc = Representa a resistência característica à compressão axial do concreto (MPa);

k_c = Fator variável referente ao tipo de cimento empregado (Tabela 4);

k_{fc} = Fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 3);

t = Idade do concreto (anos);

ad = Corresponde ao teor de adição pozolânica no concreto (% em relação à massa de cimento);

UR = Umidade relativa média do ambiente (%*0,01);

k_{ad} = Fator variável referente às adições pozolânicas do concreto (sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz), em função do cimento utilizado (Tabela 3);

k_{ur} = Fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado;

CO_2 = Refere-se ao teor de CO_2 da atmosfera (%);

K_{CO2} = Fator variável referente ao teor de CO_2 do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 3);

K_{ce} = Fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura;

Tabela 3 – Coeficientes do modelo por tipo de cimento

TIPO DE CIMENTO	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO			DO AMBIENTE	
	CIMENTO	Fc	ADIÇÃO	CO2	UR
	(Kc)	(Kfc)	(Kad)	(Kco2)	(Kur)
CP I	19,8	1,7	0,24	18	1300
CP II E	22,48	1,5	0,32	15,5	1300
CP II F	21,68	1,5	0,24	18	1100
CP II Z	23,66	1,5	0,32	15,5	1300
CP III	30,5	1,7	0,32	15,5	1300
CP IV	33,27	1,7	0,32	15,5	1000
CP V ARI	19,8	1,7	0,24	18	1300

Fonte: POSSAN, 2010.

Tabela 4– Coeficiente g do modelo em função das condições de exposição

CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO DA ESTRUTURA	
TIPO DE EXPOSIÇÃO	Kce
AMBIENTE INTERNO PROTEGIDO DA CHUVA	1,3
AMBIENTE EXTERNO PROTEGIDO DA CHUVA	1
AMBIENTE DESPROTEGIDO DA CHUVA	0,65

Fonte: POSSAN, 2010.

4 METODOLOGIA

Este trabalho iniciará com uma pesquisa descritiva, onde serão apresentados os conceitos teóricos acerca dos fatores que influenciam na carbonatação.

4.1 Modelos matemáticos

Durante a pesquisa bibliográfica, observou-se que existem diversos modelos matemáticos capazes de determinar a vida útil de uma estrutura em concreto armado, através da estimativa da profundidade da frente de carbonatação. Ao todo foram encontrados 19 modelos matemáticos propostos para esta finalidade.

Diante da quantidade de modelos destinados a esta finalidade, fez-se um banco de dados, tomando como base os diversos estudos presentes na literatura. Contudo, para o presente estudo serão utilizados os modelos propostos por Ekolu (2018) e Possan (2010), por utilizarem dados, cuja sua obtenção é mais simplificada.

Diante deste cenário, este trabalho, a fim de contribuir com as pesquisas existentes, aplicou os dois modelos selecionados em uma estrutura de concreto armado escolhida para o estudo.

4.1.1 Modelo De Ekolu

Ekolu (2018) faz uma estimativa da profundidade da frente de carbonatação a partir de uma série de equações matemáticas, este modelo parte do estudo de 10 anos da carbonatação em concreto.

O autor considerou que a carbonatação depende da umidade relativa do ar, da concentração de CO_2, da qualidade do concreto em relação a sua mistura, materiais e fatores de processo do concreto, do tipo de cimento e da presença de

fissuras e tratamentos superficiais, da cura do concreto e da utilização de agregados especiais e/ou reciclados.

4.1.2 Modelo de Possan

Possan (2010) propôs um modelo matemático que se utiliza de coeficientes tabelados, coeficientes que foram baseados em estudos da carbonatação realizados por especialistas. A proposta se utiliza de equações do comportamento do concreto e da primeira lei de Fick.

4.2 Projeto experimental

Para o trabalho experimental, será utilizada uma substância indicadora de base ácida, chamada fenolftaleína, na amostra da estrutura de concreto armado em estudo, cuja idade é de 15 anos, e esteve sujeita durante este período, aos fatores influentes da carbonatação.

Compreendeu-se, através da remoção de uma amostra da edificação em estudo, onde foi realizado um ensaio destrutivo em campo. A amostra foi secionando transversalmente, podendo-se verificar com precisão a profundidade atingida por esta patologia.

4.2.1 Descrição da estrutura em estudo

Foi então, selecionada para o estudo, uma estrutura em concreto armado, localizado no município de Colombo-PR na rua: Do Pau Brasil, rua de bastante movimento de veículos, em razão de ser o principal acesso do bairro Embú, que acaba por contribuir com elevação da concentração do gás carbônico.

A estrutura começou a ser executada por volta do ano de 2005, com o intuito de ser um restaurante, mas não foi concluída, ficando exposta as intempéries, e sem nenhuma manutenção. Devido ao fato de ter sido construída em um terreno íngreme, as laterais foram concebidas com objetivo de conter o corte do terreno, contudo, pode-se observar que a contenção foi subdimensionada, não sendo capaz de resistir às movimentações de terra, comprometendo assim a integridade estrutural da edificação.

Figura 1 - Vista frontal da estrutura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por se tratar de uma obra antiga e na prática abandonada, não foi possível obter quaisquer dados técnicos, quanto à execução da edificação. A estrutura possui 8 metros de frente por 20 metros de comprimento, totalizando 160 m². Consiste em um pavimento térreo, feita em concreto armado moldado *in loco* que se utiliza de blocos de tijolos cerâmicos como elemento de vedação, possui uma laje de 3x4m onde seriam instaladas as caixas de água.

Figura 2 - Vista interna da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

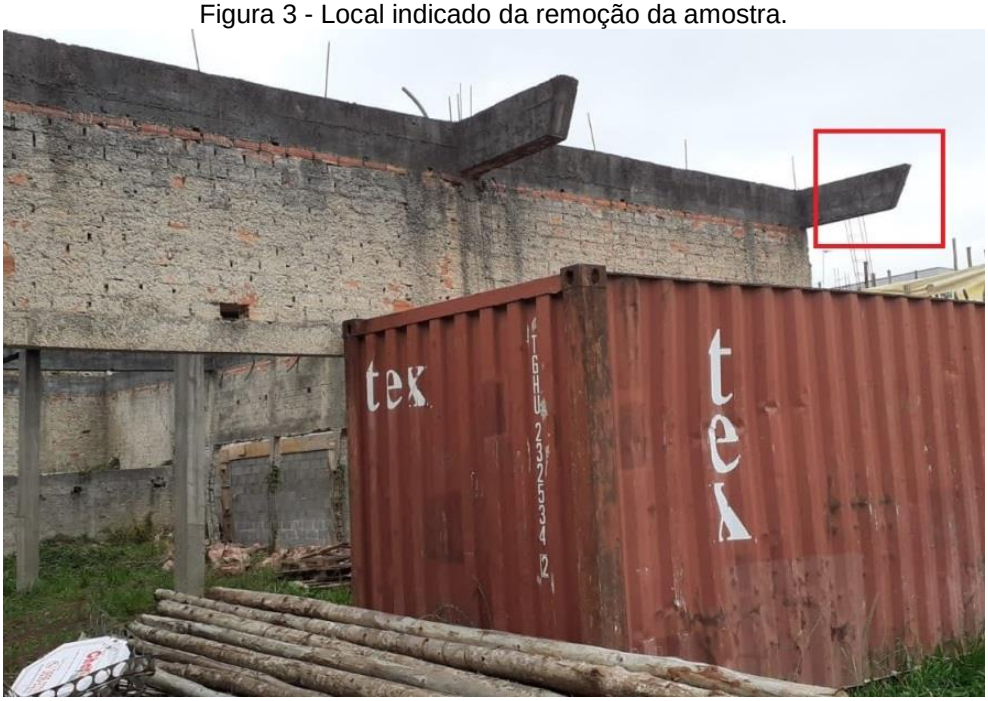
4.2.2 Detalhamento do ensaio

Para a realização do ensaio foi removida uma amostra da edificação, para que a mesma fosse seccionada transversalmente, de modo a verificar os diversos aspectos da frente de carbonatação.

Esta amostra cujas dimensões são de 53 cm na parte superior, 37 na parte inferior e altura de 38 cm, foi removida da viga superior, na parte frontal da edificação, como pode ser visto nas Figuras 3 e 4.

O local escolhido para a extração da amostra foi selecionado pelo fato de não comprometer ainda mais a estabilidade da edificação, por se tratar de um ensaio destrutivo.

Figura 3 - Local indicado da remoção da amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 - Foto da amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A trena utilizada foi comparada com um paquímetro digital devidamente aferido, e certificado pelo INMETRO.

A solução utilizada para o ensaio foi de fenolftaleína a 1% (composta de 1g de fenolftaleína + 50g de álcool + 50g de água), solução que foi aspergida na amostra com um borrifador pulverizador.

Para a realização do ensaio, a amostra foi como mencionado anteriormente, seccionada transversalmente, como pode ser visto na figura 5.

Figura 5 - Indicação do corte e foto da seção realizada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS DO ENSAIO

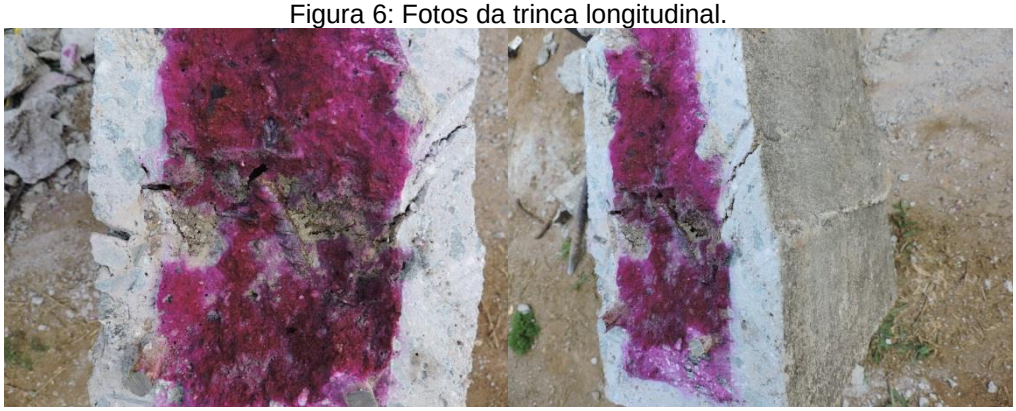
No decorrer deste trabalho foram apresentados os diversos fatores que favorecem a frente de carbonatação, como o adensamento correto, a cura do concreto, entre outros. Durante a execução do ensaio, podem-se observar as influencias destes fatores, apesar de que o objetivo geral do trabalho seja analisar a profundidade atingida por este processo físico químico, estas observações não poderiam ser omitidas, de modo que este capítulo irá evidenciar alguns fatores de influência que favoreceram o processo de carbonatação na edificação em questão.

5.1 Influências de fissuras

De acordo com os diversos autores citados neste estudo, as fissuras existentes nas estruturas, favorecem a carbonatação, facilitando a absorção do gás carbônico para o interior da peça.

Na Figura 6, observa-se uma trinca longitudinal na viga, evidenciando a absorção do Gás carbônico através da fissura para o interior da peça.

Figura 6: Fotos da trinca longitudinal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Influência do adensamento correto

De acordo com Isaia (1999) o correto adensamento diminui a porosidade do concreto, reduzindo por sua vez a absorção do gás carbônico.

Como pode ser visto na Figura 7, uma região em que a carbonatação está em estado avançado, localizada na parte inferior da forma de concretagem, logo se presume um adensamento ineficiente neste local.

Na imagem a seguir fica evidenciada a ação da carbonatação, onde o aço está completamente exposto, em faze inicial de corrosão.

Figura 7: Foto parte inferior viga.



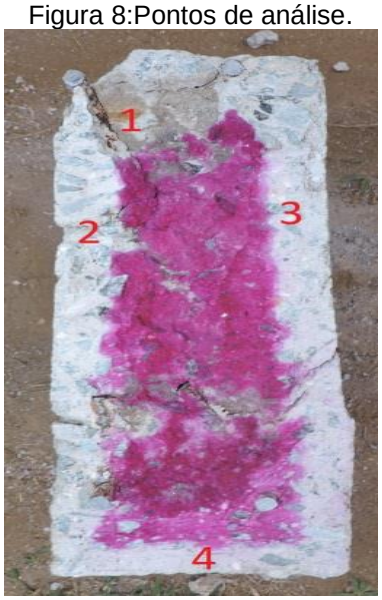
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Profundidade da frente de carbonatação

Para realizar a análise comparativa entre os modelos matemáticos e os resultados obtidos do ensaio, foram selecionados quatro pontos da amostra para medição, pois as profundidades encontradas da frente de carbonatação, não tiveram uma regularidade, variando de 22mm a 60 mm.

A figura a seguir mostra os pontos selecionados que serão utilizados para análise.

Figura 8:Pontos de análise.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela a seguir relaciona os pontos selecionados e seus respectivos valores.

Tabela 5 – Valores de pontos de análise

Ponto	Profundidade da frente de carbonatação (mm)
1	60
2	38
3	27
4	22

Fonte: Elaborado pelo autor

Contudo, como já elencado anteriormente, podem-se observar medidas muito distantes uma das outras, em razão dos diversos fatores de influência já descritos. Para análise comparativa optou-se pela menor medida verificada (22 mm), por se tratar de uma região da amostra sem grandes influências, tal como, fissuras, que foi um fator de grande relevância nos valores encontrados.

Mesmo tratando- se de uma amostra que sofreu as mesmas ações ambientais onde se encontrava as regiões com diferentes medidas se distinguem apenas por fatores relacionados há má execução como adensamento, fissuras recorrentes e relação água/cimento.

6 APLICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Para a análise proposta faram selecionados dois modelos matemáticos, em razão de seus dados serem de simples obtenção, sem depender de dados que não seriam possíveis obter através dos recursos disponíveis para o estudo, como por exemplo, o modelo proposto por Tutti (1982) que se utiliza do coeficiente de difusão efetivo do CO_2 que necessita de análise laboratorial para sua obtenção.

6.1 Modelo matemático de Ekolu (2018)

Este modelo faz uma estimativa da frente de carbonatação, através de uma sequência de equações matemáticas, na qual o autor utiliza como base, um banco de dados de com 10 anos de estudo da frente de carbonatação.

Para a elaboração deste modelo o autor levou em consideração os diversos fatores de influência da frente de carbonatação, tais como, umidade relativa, a

concentração de CO_2 e a temperatura do ambiente em que a estrutura se encontra, a proteção da mesma, a incidência de chuvas, a qualidade do concreto entre outros.

Como já apresentando este modelo matemático se apresenta de acordo com a equação a seguir:

$$y = e_h . e_s . e_{co} . cem . F_{c(t)}{}^{g} . \sqrt{t} \quad (1)$$

Onde “y” representa o valor da profundidade da frente de carbonatação em mm.

A variável “eh” é o coeficiente relacional referente à umidade relativa, para obter seu valor utiliza-se a equação a seguir:

$$e_h = 16 \times \left(\frac{RH-35}{100}\right) \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{1.5} \rightarrow 50\% \leq RH \leq 80\% \quad (27)$$

Para o valor de RH (umidade relativa do ar) foram encontrados os dados sobre a cidade de Colombo, onde se encontra a estrutura, para o estudo será utilizada a umidade média relativa anual. Foi realizada uma média do ano de 2019, os dados foram obtidos do site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) a tabela a seguir apresenta os valores:

Tabela 6 – Valores mensais médios e média anual de RH do ano 2019 de Colombo - PR.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Med. Anual
80%	80%	81%	81%	81%	80%	79%	77%	80%	80%	78%	79%	79,7%

Fonte: Dados INMET.

Aplicando os dados na equação 27 tem-se:

$$e_h = 16 \times \left(\frac{79.7-35}{100}\right) \times \left(1 - \frac{79.7}{100}\right)^{1.5} \rightarrow 50\% \leq 79.7 \leq 80\%$$

$$\therefore e_h = 0{,}66$$

Para a determinação do valor de e_s utilizou a equação a seguir:

$$e_s = \begin{cases} 1{,}0 \rightarrow Esposição\ externa\ protegida \\ {f_{c28}}^{-0{,}2} \rightarrow Exposição\ externa\ desprotegida. \end{cases} \quad (28)$$

Onde f_{c28} representa a resistência á compressão do concreto aos 28 dias de cura em MPa. Como se pode observar a estrutura em estudo se enquadra na

segunda relação, mas não foi possível obter o FCK do concreto utilizado mas por se tratar de uma obra de pequeno porte optou-se por considerar o FCK 32, por ser o mais utilizado em edificações deste porte, logo para o valor de e_s temos:

$$e_s = 32^{-0.2}$$

$$\therefore e_s = 0{,}5$$

Para a determinação do valor de e_{co} ultilizou a equação a seguir, e os respectivos coeficiente de correção da tabela 3.

$$e_{co} = \begin{cases} \alpha {f_{c28}}^{r} \rightarrow 20 < f_c < 60MPa \\ 1 \rightarrow f_c > 60\ MPa \end{cases} \quad (29)$$

Tabela 7 – Coeficientes para a equação de e_{co}.

Coeficientes	**Concentração de CO2 da atmosfera (ppm)**				
	200	300	500	1000	2000
α	1,40	1,00	2,50	4,50	14,00
r	-0,25	0,00	-0,25	-0,40	-0,67

Fonte: Ekolu (2018).

Segundo dados da National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), em abril de 2020, a concentração média de CO_2 na atmosfera era de 416,21 partes por milhão.

Portanto por aproximação, de acordo com a Tabela 7 tem-se:

$$e_{co=} 2.5 \times 32^{-0{,}25}$$

$$\therefore e_{co=}\ 1{,}05$$

O coeficiente $f_{c(t)}$ é obtido através da equação 30, e seus coeficientes de correção estão na tabela 5 dependem dos valores de resistência do concreto considerados (*fc28*, ao se considerar resistência do concreto aos 28 dias e *fcbn*, ao se considerar a resistência do concreto a longo prazo).

$$F_{ct} = \frac{t}{a+bt} \times f_c \rightarrow f_c = f_{c28}\ ou\ f_{cbn} \quad (30)$$

Tabela 8 – Coeficientes para a equação de 30.

Resistência a comp.	Idade do concreto	a	b
f_{c28}	t < 6 anos	0,35	$0{,}6 - t^{0{,}6}/50$
	t ≥ 6 anos	0,15 t	$0{,}5 - t^{0{,}5}/50$
f_{cbn}	t < 15 anos	0,35	$1{,}15 - t^{0{,}6}/50$
	t > 15 anos	0,15 t	$0{,}95 - t^{0{,}6}/50$

Fonte: Ekolu (2018)

Aplicando os dados da tabela 8 na equação 30 tem-se:

$$F_{ct} = \frac{15}{0{,}15 \times 15 + \left(\left(0{,}95 - \frac{15^{0{,}6}}{50}\right) \times 15\right)} \times f_c$$

$$\therefore F_{ct} = 32{,}05$$

E para o coeficiente g utiliza-se o valor de -1.4 de acordo o teor de adições presentes no cimento, como pode ser visto na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9 – Coeficiente g.

Materiais suplementares	Tipos de cimento	Fator de condutância "g"
20% quaisquer	CEM I, CEM II/A	-1,5
30% cinza volante	CEM II/B, CEM IV/A	-1,4
50% escoria	CEM III/A	

Fonte: Ekolu (2018)

Aplicando todas as variáveis obtidas tem-se:

$$y = 0{,}66 \times 0{,}5 \times 1{,}05 \times 1000 \times 32{,}05^{-1.4} \times \sqrt{15}$$

$$y = 10{,}39\ mm$$

Portanto, o modelo matemático de Ekolu nos fornece uma profundidade de 10,39 mm, no período de tempo de 15 anos, levando em consideração os diversos fatores relacionados pelo autor.

6.2 Modelo matemático de Possan

Este modelo estima a profundidade da carbonatação com uma equação, que utiliza dados tabelados pela própria autora, partindo da análise, da degradação causada pela carbonatação. Possan considerou, para ajustar os coeficientes empregados no modelo matemático, 1298 dados, idealizados por diversos estudiosos do assunto (RIGO, 2018).

A equação a seguir apresenta o modelo matemático onde y representa a profundidade de carbonatação média do concreto em mm.

$$y = k_c \cdot \left(\frac{20}{fc}\right)^{kfe} \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ exp\left[\left(\frac{k_{ad}.ad^{\frac{3}{2}}}{40+ f_c}\right) + \left(\frac{k_{co_2}.CO_2{}^{\frac{1}{2}}}{60+f_c}\right) - \left(\frac{k_{UR}.(UR.058)^2}{100+f_c}\right) \right] \right\} . k_{ce} \qquad (27)$$

Como mencionado, esta equação baseia-se em dados tabelados. Logo, a partir delas serão apresentados os dados referentes à estrutura em questão.

Os dados da tabela 3 estão ordenados em função do tipo de cimento, porém, como não foi possível obter os dados técnicos e informações detalhadas da edificação em estudo, e como já mencionado anteriormente, será considerado que foi utilizado para a execução da estrutura, o cimento CP II F 32, que segundo Arnaldo Forti Battagin (gerente de laboratório Associação Brasileira de Cimento Portland) sendo muito versátil, pode ser empregado nas diversas etapas do projeto, sendo assim o mais utilizado no Brasil.

Os dados a seguir apresentados foram retirados das Tabelas 3 e 4, em função do tipo de cimento e da condição de exposição da estrutura:

K_c = 21,68;
K_{fc} = 1,5;
K_{ad} = 0,24;
K_{co2} = 18;
K_{ur} = 1100;
K_{ce} = 0,65;

O coeficiente f_c = 32 em razão da resistência característica do concreto à compressão; t = 15 representa a idade da edificação de quinze anos; ad = 0 representa porcentagem pozolânica do cimento; C_{o2} = 0,0416 é o percentual de gás

carbônico presente na atmosfera; UR = 0,797 é a umidade relativa média do ambiente (%*0,01).

Substituindo os dados encontrados na equação 27:

$$y = 21{,}68 \times \left(\frac{20}{32}\right)^{1,5} \left(\frac{15}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left\{exp\left[\left(\frac{0{,}24\times 0^{\frac{3}{2}}}{40+32}\right) + \left(\frac{18\times 0{,}0416^{\frac{1}{2}}}{60+32}\right) - \left(\frac{1100\times(0{,}797X.058)^2}{100+32}\right)\right]\right\} \times 0{,}65$$

$$\therefore y = 4{,}24\ mm$$

Portanto o modelo matemático de Possan (2010) nos fornece uma profundidade da frente de carbonatação de 4,24 mm.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como vimos através do ensaio, foram obtidas diversas medidas para frente de carbonatação, contudo, considerando as diversas variáveis que influenciam no processo desta patologia, utilizamos para análise comparativa proposta por este estudo a medida de 22 mm, encontrada na parte superior da amostra, por ser uma região que sofreu menos influências que não são consideradas nos modelos matemáticos, como por exemplo as fissuras.

A Tabela 10 relaciona todos os valores obtidos através dos ensaios e modelos matemáticos.

Tabela 10 – Tabela comparativa de dados reais com valores de modelos matemáticos.

Ensaio (mm)	Modelo de Ekolu		Modelo de Possan	
	Estimado (mm)	Erro	Estimado (mm)	Erro
22	10,39	11,61 mm 52,80 %	4,24	17,76 mm 80,73 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como podemos ver o modelo proposto por Ekulo (2010) apresentou um erro de 52,80%, que, no entanto, se aproximou mais do valor real em comparação ao modelo de Possan, que por sua vez, forneceu um erro de 17,76 mm representando 80,73 %.

8 E RECOMENDAÇÕES

Com base nos estudos realizados podemos verificar que a carbonatação pode ser influenciada por diversos fatores, tais como a umidade relativa do ar e a concentração de gás carbônico presente no ambiente, ou seja, em ambiente cuja concentração seja mais elevada, a profundidade da frente de carbonatação será maior. Outro fator de grande influência é a porosidade que está diretamente ligada à qualidade de execução do concreto assim como a relação água/cimento.

Podemos ver que esta patologia age de fora para dentro da peça, ou seja, é caracterizada como uma frente de carbonatação, que avança da parte mais externa da peça para o seu interior, alterando a alcalinidade do concreto que em condições normais gira em torno de 12,5 para valores de pH em torno de 9.

Situação que pode ser verificada no ensaio realizado com fenolftaleína, (substância que reage com os diversos níveis de pH do concreto), cujos valores encontrados variaram expressivamente, devido aos fatores de influência que favorecem a carbonatação, que por sua vez afetaram os diversos pontos de análise da amostra da edificação.

Com o estudo observou-se a importância do correto cobrimento do concreto armado, que quando adequado ao meio em que a estrutura se encontra, resulta em uma maior vida útil da estrutura, frente às caraterísticas e influências da carbonatação.

Os modelos matemáticos analisados apresentaram uma grande variação dos dados reais, diferença que pode ser considerada alta, quando falado em vida útil de uma edificação.

Esta diferença pode ser dada em razão de fatores que não são considerados nos modelos estudados, como fissuras, adensamento, relação água/cimento, fatores de grande influência para o avanço da frente de carbonatação, além da falta de qualidade quanto e execução desta estrutura em estudo, como pode ser visto até mesmo pelo posicionamento da armadura dentro da peça.

Para tanto, existem outros diversos modelos presentes na literatura, que se utilizam de dados mais refinados, e uma maior quantidade de informações, presume-se que estes possam fornecer resultados mais próximos a uma situação real.

Vale ressaltar as poucas informações obtidas da estrutura em estudo, como tipo de cimento, relação água/cimento, entre outros. Informações estas, que são

difíceis de obter por se tratar de uma estrutura abandonada.

Pode-se verificar a grande importância da qualidade de uma edificação, falando desde o projeto até a execução, como pode ser visto na estrutura em estudo, que com apenas 15 anos de idade já apresenta sinais de comprometimento.

Mas, apesar da grande diferença, os modelos de carbonatação são de grande valia, pois podem nos dar uma previsão de vida útil para uma nova edificação, cujos dados serão mais exatos e precisos.

Portando, a previsão da vida útil de uma estrutura em concreto armado pode ser um trabalho complexo, mas, que pode nos dar resultados consideráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armadura: iniciação por cloretos**. 2001. 257f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade

BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: Schiessl, P., ed. **Corrosion of steel in concrete**. Cap. 3, p.22-55. London, Chapman and Hall, 1988.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais**. Uma introdução, v. 5, p. 189-250, 2002.

CAPRARO, Ana Paula Brandão et al. **Estudo da previsão da vida útil de uma estrutura em concreto armado: iniciação da corrosão por carbonatação**. Revista de Engenharia Civil IMED, v. 6, n. 2, p. 53-68, 2019.

CARMONA, Thomas Garcia. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão das Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. Ed. PINI, São Paulo, Ed. UFG, 1997. 237p.

CUNHA, Ana Carla Quintas da; HELENE, Paulo RL. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. 2001.

CHANDRA, S.; CEDERWALL, K.; NILSSON, I. H. E. **Durability problems in Swedish concrete bridges** - case studies. In: P.K. METHA

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. New York, Oxford University Press, 1975.

EKOLU, Stephen O. **Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation. Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 40-56, 2018.

ESTEVES, Ian Cesar Amos et al. **Influência do consumo de cimento na dosagem do concreto sobre a formação da película passivadora do aço**. Revista Técnico-Científica, v. 1, n. 12, 2018.

Federal do Rio Grande do Sul. 2001. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2613/000323380.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 maio 2020.

FERREIRA, Murillo Batista et al. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013.

FIGUEIREDO, E.J.P. **Avaliação do Desempenho de Revestimentos para Proteção da Armadura Contra a Corrosão Através de Técnicas Eletroquímicas - Contribuição ao Estudo de Reparo de Estruturas de Concreto Armado**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

FRANGOPOL, D. M.; LIN, K-Y; ESTES, A. C. **Life-cycle cost design of deteriorating structures**. Journal of Structural Ingineering, v. 123,n. 10, p. 1390-1401, 1997.

GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GHODS, P.; ISGOR, O. B.; MCRAE, G.; MILLER, T. **The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement**. Cement and Concrete Composites, v. 31, n. 1, p. 2-11, 2009.

HELENE, P. **Corrosão das Armaduras em Concreto Armado**. In: 4º Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto. Anais. São Paulo, 1981.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção das estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. São Paulo, 1993, 271 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HELENE, PR do L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, v. 231, p. 14, 1993.

HELENE, Paulo. **Vida útil das estruturas de concreto**. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais... Porto Alegre, RS. 1997.

ISAIA, G. C. **Carbonatação do concreto: uma revisão**. Santa Maria, 41p. 1999.

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

NILSSON, R. J.; KENNEDY, E. S.; WEST, JILLIAN A. **The birdlife of South East Island (Rangatira)**, Chatham Islands, New Zealand. Notornis, v. 41, n. supplement, p. 109-125, 1994.

PAN, T.; LU, Y. **Quantum-Chemistry Based Studying of Rebar Passivation in Alkaline Concrete Environment**. International Journal of Electrochemical Science, Belgrado, v. 6, p. 4967-4983, 2011.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. **Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation**. ACI Journal, v.88, n.4, July-Auguste, 1991b.

PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Cement and Concrete Association report, 1987.

POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010.

POURSAEE, Amir. **Corrosion of steel bars in saturated Ca(OH)2 and concrete pore solution. Concrete research letters**, v. 1, n. 3, p. 90-97, 2010.

REPETTE, W. **Modelo de Previsão de Vida Útil de Revestimentos de Proteção da Superfície do Concreto em Meios de Elevada Agressividade**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997. 231 p.

RIGO, Eduardo; OLIVEIRA, Carlos Eduardo de; POSSAN, Edna. **Aplicação de modelagem matemática para fins de previsão de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à ação de CO_2**.

RIGO, Eduardo; DE OLIVEIRA, Carlos Eduardo; POSSAN, Edna. **Previsibilidade de vida útil em estruturas de concreto armado: uma análise sob a ótica da profundidade de carbonatação**. Revista Técnico-Científica, v. 1, n. 12, 2018.

SAETTA, A. V.; SCHREFLER, B. A.; VITALIANI, R. V. **The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials**. Cement and Concrete Research, v. 23, n. 4, p. 761-772, 1993.

SAETTA, A. V.; SCHREFLER, B. A.; VITALIANI, R. V. 2 – **D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials**. Cement and Concrete Research, v. 25, n. 8, p. 1703-1712, 1995.

SAETTA, A.V.; VITALIANI, R. V. **Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation**. Cement and Concrete Research, v. 34, p.571-579, 2004.

SCHIESSL APUD, CAMPBELL-ALLEN, D.; ROPER, HAROLD, **Concrete structures: materials, maintenance and repair**. 1991.

SILVA, VALDIRENE. **Ação da Carbonatação em Vigas de Concreto Armado em Serviço, Construídas em Escala Natural e Reduzida**. 2007. 281. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia de Estruturas, Univ. de São Paulo, São Paulo, São Paulo.

Symposium on durability of concrete, 1994, Nice. Proceedings ... Nice: ACI, 1994, p. 223-241.

TAFFESE, W. Z., SISTONEN, E. (2013), "**Service life prediction of repaired structures using concrete recasting method: state-of-the-art**", Procedia Engineering 45, pp. 1138–1144.

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

UOMOTO, T.; TAKADA, Y. **Factors affecting concrete carbonation rate. In: Durability of building materials and components**, 6th. Anais... , E. & F.N. SPON. S. Nagataki, T. Nireki and F. Tomosawa, 1993

VALENÇA, DANIEL VICTOR DA COSTA. **Análise da deterioração do concreto por carbonatação natural com exposição às classes de agressividade ambiental marinha e respingos de maré**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

YOON, IN-S.; ÇOPUROĞLU, O.; Park, Ki-B. **Effect of global climatic change on carbonation progress of concret**e. Atmospheric Environment, v 41, n 34, p.7274-7285, 2007.