


# PROCESSO DE CARBONATAÇÃO NO CONCRETO E MODELOS PARA SUA PREVISÃO: UMA REVISÃO

## CARBONATION PROCESS IN CONCRETE AND MODELS FOR ITS PREDICTION: A REVIEW

Lucas Fernando Krug<sup>1</sup> Flávia Izabel Bandeira Krug<sup>2</sup> Maurício de Campos<sup>3</sup> Paulo Sérgio Sausen<sup>4</sup> Airam Teresa Z. R. Sausen<sup>5</sup> 

**Resumo:** O processo de degradação das estruturas de concreto armado é um fator importante e que gera preocupação na indústria da construção civil. Um dos agentes agressivos mais preocupantes é o dióxido de carbono, causador do fenômeno conhecido como carbonatação. A carbonatação é um dos fatores associados aos problemas de degradação precoce, pois é através dela que ocorre a redução do pH do concreto retirando a proteção alcalina que o mesmo exerce sobre as armaduras, ficando sujeitas à corrosão. Nos últimos anos houve um crescimento considerável de anomalias nas edificações, relacionadas a problemas de corrosão do aço, advindos do processo de carbonatação. Apesar de ser um fenômeno presente e responsável pela redução da vida útil e da durabilidade das estruturas a carbonatação ainda não é compreendida de maneira abrangente, por se tratar de um assunto complexo, afetado por muitos fatores. Com base nisso, realiza-se neste artigo uma revisão da literatura para aprofundar o conhecimento sobre a carbonatação e possibilitar a sua compreensão. A partir da pesquisa desenvolvida busca-se explicar as variáveis que influenciam esse fenômeno, além de apresentar e discutir modelos matemáticos empíricos utilizados para determinar a frente de carbonatação em elementos de concreto.

**Palavras-chave:** Durabilidade. Modelagem Matemática. Dióxido de Carbono.

**Abstract:** The process of degradation of reinforced concrete structures is an important factor that generates concern in the civil construction industry. One of the most worrying aggressive agents is carbon dioxide, which causes the phenomenon known as carbonation. Carbonation is one of the factors associated with problems of early degradation, as it is through it that the pH of the concrete is reduced, removing the alkaline protection that it exerts on the reinforcement, becoming subject to corrosion. In recent years there has been a considerable increase in anomalies in buildings, related to steel corrosion problems, arising from the carbonation process. Despite being a present phenomenon and responsible for reducing the useful life and durability

<sup>1</sup> Doutorando em Modelagem Matemática, UNIJUI, E-mail: lucas.krug@unijui.edu.br.

<sup>2</sup> Mestra em Modelagem Matemática, UNIJUI, E-mail: flavia.bandeira@sou.unijui.edu.br.

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Elétrica, UNIJUI, E-mail: campos@unijui.edu.br.

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia Elétrica, UNIJUI, E-mail: sausen@unijui.edu.br.

<sup>5</sup> Doutora em Engenharia Elétrica, UNIJUI, E-mail: airam@unijui.edu.br.

of structures, carbonation is still not comprehensively understood, as it is a complex subject, affected by many factors. Based on this, a literature review is carried out in this article to deepen the knowledge about carbonation and enable its understanding. Based on the research carried out, we seek to explain the variables that influence this phenomenon, in addition to presenting and discussing empirical mathematical models used to determine the carbonation front in concrete elements.

**Keywords:** Durability. Mathematical Modeling. Carbon Dioxide.

# 1 INTRODUÇÃO

A grande quantidade de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera é uma questão ambiental capaz de influenciar diretamente na alteração do clima do planeta, interferindo assim nas condições da vida humana. Mas além disso, essa emissão de gás carbônico é uma preocupação também na indústria da construção civil, pois interfere na vida útil e na durabilidade das estruturas de concreto armado (MARTINS *et al.*, 2018). Isso decorre do fato desse gás ser o causador do fenômeno conhecido como carbonatação.

A carbonatação do concreto é o resultado da reação do dióxido de carbono presente na atmosfera com compostos do cimento hidratado, formando carbonato de cálcio. A partir desse processo ocorre a redução do pH do concreto, retirando assim a proteção alcalina que o mesmo exerce sobre a armadura, podendo então iniciar-se a corrosão do aço (TORGAL *et al.*, 2012). Ahmad (2003) explica que o desenvolvimento da corrosão das armaduras prejudica a durabilidade das estruturas em concreto armado. Como a ferrugem resultante do processo corrosivo apresenta expansão de volume, ocorrem tensões de tração que ocasionam trincas e rachaduras no cobrimento do concreto. Estas reduzem significativamente a capacidade de carga da estrutura, além de facilitar o acesso dos agentes agressivos, contribuindo para o aumento do processo corrosivo. Concomitantemente a isto, a corrosão reduz também a seção transversal do vergalhão, comprometendo ainda mais o suporte de carga, podendo causar o colapso total da estrutura.

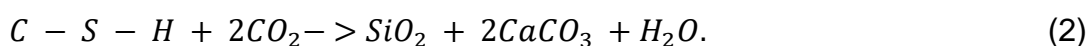
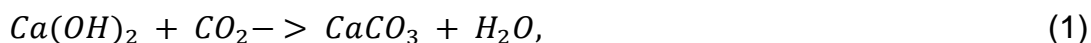
Nos últimos anos houve um crescimento considerável de anomalias nas edificações, relacionadas a problemas de corrosão do aço, normalmente advindas do processo de carbonatação. Isso gerou também o aumento da preocupação dos proprietários dos edifícios em relação a vida útil dos mesmos, afinal são necessários altos investimentos para reparos e fortalecimento das estruturas (MONTEIRO *et al.*, 2012). Indo ao encontro disso e como forma de garantir os requisitos mínimos de durabilidade em sistemas estruturais, a norma brasileira NBR 15575-2 (ABNT, 2013) recomenda a realização de ensaios de envelhecimento acelerado e aplicação de modelos para previsão do avanço de frentes de carbonatação nos elementos de concreto.

Para verificar a profundidade de carbonatação e estimar a vida útil das estruturas alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos ao longo do tempo (POSSAN; FELIX; THOMAZ, 2016). No entanto, a carbonatação é um fenômeno complexo, o qual envolve muitas variáveis que dificultam seu completo entendimento e podem não refletir realisticamente as condições *in situ* (QIU, 2020). Para compreendê-la de maneira abrangente realizou-se neste artigo uma revisão da literatura sobre o assunto.

Inicialmente, esta revisão explica os fundamentos da carbonatação e os fatores que influenciam no processo (seção 2). Na sequência, na seção 3, é apresentada e discutida a aplicabilidade/representatividade dos modelos matemáticos empíricos desenvolvidos para a previsão do avanço da carbonatação, seja com base em ensaios acelerados ou de aplicação direta. Por fim, na seção 4, apresenta-se as principais conclusões sobre a pesquisa realizada.

## 2 FUNDAMENTOS DA CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

A carbonatação no concreto é um processo físico-químico onde o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera penetra pelos poros do concreto e reage com os produtos de sua hidratação, como hidróxido de cálcio (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formando carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e gel de sílica. As equações que representam esse processo são descritas na sequência (ROSTAMI *et al.*, 2012).



Em estágio inicial o concreto é um ambiente altamente alcalino com nível de pH próximo a 13, em virtude da grande quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> resultante da hidratação de silicatos de cimento e álcalis existentes. Essa elevada alcalinidade forma em torno das barras de aço uma camada passivante que as protege do fenômeno de corrosão. Conforme o CO<sub>2</sub> penetra no sistema ocorre a produção de CaCO<sub>3</sub> e água, ou seja, à medida que o conteúdo de Ca(OH)<sub>2</sub> diminui o

conteúdo de  $\text{CaCO}_3$  aumenta gradualmente. Como o Carbonato de Cálcio é facilmente lixiviado, o concreto se transforma em um ambiente com baixo valor de pH, resultando em uma menor alcalinidade. Isso extingue a camada passivante do aço, ficando suscetível a corrosão (LU *et al.*, 2018; MONTEIRO *et al.*, 2012; QIU, 2020; WERLE; KAZMIERCZAK; KULAKOWSKI, 2011).

A carbonatação no concreto por si só não causa danos quando relacionada ao seu desempenho, pelo contrário pode até melhorar a resistência à compressão (CHI; HUANG; YANG, 2002). Como o resultado do processo é  $\text{CaCO}_3$  e este ocupa mais volume quando comparado a  $\text{Ca(OH)}_2$  há uma redução da porosidade do concreto. Essa diminuição de porosidade é a razão pela qual as propriedades mecânicas do concreto carbonatado são superiores ao do não carbonatado (HUSSAIN; BHUNIA; SINGH, 2017). O problema surge quando a frente de carbonatação atinge a região da armadura, ocasionando sua despassivação, expondo o aço diretamente ao oxigênio e a água e possibilitando assim sua corrosão (ANN *et al.*, 2010).

Como forma de observar a frente de carbonatação existem diversos métodos, sendo que um dos mais utilizados em campo é o que envolve o indicador de fenolftaleína. A fenolftaleína é pulverizada sobre as faces do concreto sendo que a coloração muda para cor púrpura rosada nas áreas onde o pH da solução porosa é superior a 9,5 e permanece incolor nas regiões de pH inferior, indicando as zonas carbonatadas (HUSSAIN; BHUNIA; SINGH, 2017).

## **2.1 Fatores que influenciam a Carbonatação**

Diferentes estudos foram desenvolvidos ao longo do tempo a fim de compreender o avanço da frente de carbonatação, mas mesmo assim esse assunto continua sendo complexo (EKOLU, 2016). As dificuldades são decorrentes dos muitos fatores capazes de influenciar o processo, sendo eles relacionados principalmente as propriedades do concreto e aos fatores ambientais externos (CHEN; LIU; YU, 2018). Nesta seção serão discutidos alguns destes fatores.

### **2.1.1 Condições de Cura**

As condições de cura, em especial o tempo de cura, tem um grande efeito sobre a durabilidade dos concretos convencionais (BALAYSSAC; DÉTRICHÉ; GRANDET, 1995). Ele impacta diretamente na permeabilidade do concreto, resistência e profundidade de carbonatação. Quando a sua execução é prolongada e suficiente há um aumento na resistência, diminuição da permeabilidade e conseqüentemente redução da carbonatação (RAO; MEENA, 2017). Além desta condição, observa-se ainda que o tipo de cura também exerce influência na carbonatação, podendo esta ser ao ar ou úmida. Younsi (2011) em seu estudo analisou a influência do modo de cura na porosidade e carbonatação de concreto com alto teor de cinzas. Uma quantidade de amostras foram conservadas ao ar após a desmoldagem e outras curadas sob a água, ambas por um período de 28 dias. Como resultados foi verificado que após esse intervalo de tempo na água, todas as misturas mostraram-se 10% a 20% menos porosas do que as armazenadas ao ar, pois a conservação de baixo de água favorece a hidratação do cimento. Além disso, em relação a carbonatação a cura úmida teve um efeito benéfico, pois as profundidades de carbonatação foram cerca de 20% a 50% menores do que no caso de cura ao ar.

### **2.1.2 Composição do Cimento**

Pesquisas apontam que a composição do cimento influencia diretamente no processo de carbonatação. É através da reação química entre o CO<sub>2</sub> e os produtos de hidratação de cimento (CH e C-S-H) que resulta a degradação dos materiais (MARANGU; THIONG; MUTHENGIA, 2019). Com o objetivo de substituir parte do clínquer e obter propriedades melhores ou semelhantes ao cimento Portland comum desenvolvem-se estudos com cimentos contendo diferentes tipos de substituições. Os materiais cimentícios suplementares principalmente a cinza volante e a escória são as duas substituições mais amplamente utilizadas para produzir os cimentos misturados, além da fumaça de sílica, metacaulim, cinza de casca de arroz e pozolanas naturais. (SHAH; BISHNOI, 2018).

De acordo com Maragu (2019) em geral os cimentos misturados, ou seja, aqueles onde há a substituição parcial do Cimento Portland Comum por materiais pozolânicos, são mais suscetíveis à carbonatação e consequentemente degradação, pois neste caso há uma diminuição na quantidade de CH, sendo este quem fornece a alcalinidade necessária ao cimento endurecido.

### **2.1.3 Concentração de CO<sub>2</sub>**

O nível de concentração de CO<sub>2</sub> é um dos parâmetros ambientais externos importantes que afeta a taxa de carbonatação. Sabe-se que em ambientes rurais a concentração desse gás é aproximadamente 0,03% (300 ppm) e nas grandes cidades pode chegar a 0,3% ou em casos extremos a 1% (POSSAN *et al.*, 2017). Além disso os níveis de CO<sub>2</sub> podem ser maiores em espaços confinados, como sob um viaduto de ponto de tráfego e túneis em comparação com o ambiente circundante, devido ao efeito dispersivo do vento neste último (EKOLU, 2016).

A carbonatação do concreto exposto ao ambiente seria a maneira mais realista para analisar os efeitos da concentração de CO<sub>2</sub>, mas o processo natural é muito lento e leva muito tempo para exibir um efeito significativo. Por isso são realizados testes acelerados para possibilitar a sua análise e posterior relação com as situações reais (EKOLU, 2016; LEEMANN; MORO, 2016). As concentrações de CO<sub>2</sub> usadas nestes testes podem variar amplamente de 0,03% a 100% (LEEMANN; MORO, 2016).

Cui *et al.* (2015) em sua pesquisa com ensaios acelerados sobre os efeitos da concentração de CO<sub>2</sub> nos mecanismos de carbonatação e difusão do concreto, constataram que sob a mesma idade houve maior profundidade de carbonatação nas amostras de concreto expostas a baixa concentração de CO<sub>2</sub> (de 2% a 20%) e menor quando as concentrações eram altas (50% a 100%). Quando há suprimento suficiente de dióxido de carbono, os poros da camada mais externa de concreto são preenchidos e entupidos com partículas, tornando-se menos permeável a difusão de CO<sub>2</sub>. Por isso não há diferença significativa

nas profundidades de carbonatação quando amostras de concreto são expostas a concentração de gás superior a 20%.

#### **2.1.4 Umidade e Temperatura**

A umidade relativa existente (UR) afeta fortemente a taxa de carbonatação, uma vez que a penetração do dióxido de carbono depende do grau de saturação de água nos poros da matriz do cimento (ANN *et al.*, 2010; BERNAL *et al.*, 2014; MARANGU; THIONG; MUTHENGIA, 2019). O teor ideal de umidade ainda é discutido na literatura, o que sabe-se é que com baixa UR, a umidade no interior do material cimentício é muito baixa para causar carbonatação. Do contrário em ambientes excessivamente úmidos os poros de concreto costumam estar saturados de água. Dificultando assim, a penetração de CO<sub>2</sub> através do material (QIU, 2020). Segundo Chen *et al.* (2018) a profundidade de carbonatação do concreto aumenta com o aumento da umidade relativa e atinge o pico quando a umidade relativa é de 70%. Bertos *et al.* (2004) salientam que a carbonatação é considerada ótima quando a umidade relativa é mantida em 50%-70% e a pressão é ligeiramente positiva. Já ANN *et al.* (2010) estabelecem que o intervalo onde a carbonatação é mais ativa é entre 50% e 60% de umidade relativa.

Também é importante observar que o efeito da UR é associado à temperatura ambiente e vice-versa. Do ponto de vista da cinética de difusão e reação, a taxa de carbonatação aumenta visivelmente a temperaturas entre 20°C e 60°C. No entanto, observa-se um baixo nível de umidade relativa do ar para reduzir o efeito da temperatura elevada na cinética da carbonatação (QIU, 2020).

### **3 MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS**

A vida útil de um elemento estrutural é compreendida como o tempo após sua construção, no qual suas propriedades excedem um nível mínimo aceitável, quando realizadas ações de manutenção (MONTEIRO *et al.*, 2012). A durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto estão relacionadas às condições ambientais e fatores degradantes (MARTINS *et al.*, 2018). Zhang

(2016) enfatiza que a deterioração do concreto é normalmente causada por processos físicos e químicos, entre eles o processo de carbonatação.

A fim de entender e modelar os mecanismos de deterioração em estruturas de concreto muitos estudos surgiram nos últimos anos. Destes resultaram diferentes modelos matemáticos empíricos para estimar a profundidade de carbonatação e visualização de vida útil (MARTINS *et al.*, 2018; MONTEIRO *et al.*, 2012; POSSAN; FELIX; THOMAZ, 2016). Estes métodos são baseados em ajustes de dados de campo ou de laboratório ou experiências de especialistas, e geralmente têm solução analítica (POSSAN; FELIX; THOMAZ, 2016). Alguns autores utilizaram ao longo dos anos a metodologia empírica em suas pesquisas devido a fácil aplicabilidade, entre eles Hussain *et al.* (2016), Wang *et al.* (2013), Possan *et al.* (2016) e Martins *et al.* (2018).

Uma das maneiras mais práticas e simples de prever a profundidade de carbonatação é considerando a segunda lei de difusão de *Fick*, onde a difusão faz com que a concentração mude com o tempo. A partir dela, Tuutti (1982) propôs uma expressão geral baseada na lei da raiz quadrada, como sendo:

$$x = k\sqrt{t}, \quad (3)$$

onde: a profundidade de carbonatação  $x$  varia linearmente com a raiz quadrada do tempo de exposição  $t$ , e  $k$  é o coeficiente de carbonatação. Com ela é possível estimar o avanço da frente de carbonatação no ambiente natural com base nos resultados medidos a partir do ensaio de carbonatação acelerada (QIU, 2020; HUSSAIN; BHUNIA; SINGH, 2016).

Conforme Shu *et al.* (2013) para investigar a aplicação e precisão de um modelo os resultados obtidos através de simulações devem ser comparados com testes em laboratório. Em seu estudo os autores utilizaram amostras de dados de profundidade de carbonatação de diferentes conjuntos de concreto e de diferentes literaturas, tendo como objetivo analisar o modelo tradicional apresentado na Equação 3. Após obtidas as curvas de profundidade de carbonatação versus tempo, tanto pelo ajuste do modelo genérico quanto pelos dados pesquisados, observou-se que ambas as amostras apresentaram o

mesmo comportamento em formato de 'X'. Nesse contexto a profundidade de carbonatação pesquisada é maior do que a profundidade ajustada na parte inicial do processo de carbonatação, mas inverte na parte de trás.

Analisando também o quadrado da profundidade de carbonatação a partir dos dados, Shu *et al.* (2013) concluíram que uma falha comum e ponto chave do erro de ajuste dos modelos é que o quadrado da profundidade de carbonatação não é linear ao tempo de carbonatação, como implícito no modelo generalizado da Equação 3.

O fenômeno de carbonatação no ambiente natural é muito lento, devido à baixa temperatura e baixo nível de concentração de CO<sub>2</sub>, demandando anos de estudo. Por isso realizar o ensaio acelerado permite a obtenção de resultados para diferentes materiais e condições de exposição em um tempo razoavelmente curto, servindo de base para o cálculo da carbonatação no ambiente natural (KHUNTHONGKEAW; TANGTERMSIRIKUL; LEELAWAT, 2006).

Hussain *et al.* (2016) desenvolveram sua pesquisa sobre a avaliação da profundidade da carbonatação em condições aceleradas e naturais com base na Equação 3. Para possibilitar uma melhor extrapolação dos dados de ensaio acelerado para o real apresentaram a partir desta, a seguinte relação entre o coeficiente de carbonatação acelerada e o coeficiente de carbonatação natural:

$$\frac{k_{acc}}{k_{nat}} = \frac{\sqrt{\theta_{acc}}}{\sqrt{\theta_{nat}}}, \quad (4)$$

onde:  $k_{acc}$  é o coeficiente de carbonatação acelerada,  $k_{nat}$  o coeficiente de carbonatação natural,  $\theta_{acc}$  é a concentração de dióxido de carbono acelerada e  $\theta_{nat}$  é a concentração natural no ambiente.

Por fim, compararam os dados obtidos com os de profundidade de carbonatação de uma estrutura real de mesma idade que a calculada pelos modelos. Observou-se então que os valores diferem em sua magnitude, o que pode ser explicado pelas condições controladas do ensaio acelerado (como umidade, temperatura e concentração de CO<sub>2</sub>), enquanto que a estrutura exposta ao ambiente natural não possui tais restrições (HUSSAIN; BHUNIA; SINGH, 2016).

Wang *et al.* (2013) por sua vez propuseram uma melhoria na fórmula empírica da Equação 3 pelo fato de que esta contém apenas um parâmetro de entrada  $k$ , não tendo capacidade para ajustar bem o comportamento investigado, produzindo geralmente erros consideráveis. Para lidar com esse erro de ajuste, apresentaram o seguinte modelo contendo dois parâmetros de entrada:

$$x = kt^m, \quad (5)$$

onde:  $x$  é a profundidade de carbonatação do concreto,  $k$  e  $m$  são dois parâmetros indeterminados e  $t$  é o tempo de exposição. Com diferentes valores de  $k$  e  $m$  o modelo pode melhor ajustar os dados obtidos através dos testes acelerados.

A partir da Equação 5 foram deduzidas ainda outras fórmulas matemáticas, adequadas a concretos com diferentes resistências à compressão  $f$ , várias concentrações de dióxido de carbono  $c$  e taxas de substituição variadas de cinzas volantes  $r$ , sendo estas equações apresentadas respectivamente a seguir.

$$x = F_1 e^{-F_2 f} t^{-F_3 f + F_4}, \quad (6)$$

$$x = C_1 c^{-C_2} t^{-C_3 c + C_4}, \quad (7)$$

$$x = (R_1 r + R_2) t^{-R_3 r + R_4}, \quad (8)$$

onde:  $x$  é a profundidade de carbonatação do concreto,  $t$  é o tempo de exposição,  $F_1, F_2, F_3, F_4, C_1, C_2, C_3, C_4$ , e  $R_1, R_2, R_3, R_4$  são parâmetros do modelo. Em ambas as modelagens representadas pelas Equações 6, 7 e 8 houve redução de erros entre os dados testados e a simulação empírica devido ao maior número de variáveis consideradas (WANG *et al.*, 2013).

Possan *et al.* (2016) por sua vez apresentaram um modelo empírico de degradação mais aprofundado para estimar a profundidade de carbonatação do concreto ao longo do tempo, que contempla diversos fatores importantes e tem uma ótima representatividade (de cerca de 85% dos casos testados). Diferente dos modelos mostrados anteriormente ele não necessita da realização de testes

acelerados para a obtenção da profundidade de carbonatação, fornecendo resultados de forma direta. O modelo proposto por Possan *et al.* (2016) é apresentado a seguir.

$$y(t) = k_c \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40+f_c}\right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60+f_c}\right) - \left(\frac{k_{UR} \cdot (UR-0.58)^2}{100+f_c}\right)\right] \cdot k_{ce}, \quad (9)$$

onde:  $y(t)$  é a média da profundidade de carbonatação (mm);  $f_c$  é a resistência característica à compressão do concreto (em MPa);  $k_c$  é o fator de acordo com o tipo de cimento;  $k_{fc}$  é o fator relativo à resistência à compressão do concreto, dependendo de qual cimento é utilizado;  $t$  é a idade do concreto (ano);  $ad$  é a porcentagem de pozolâna no concreto (em relação a massa do cimento);  $k_{ad}$  é o fator para adições pozolânicas de concreto (fumo de sílica, metacaulino e cinza de casca de arroz, de acordo para o cimento usado);  $RH$  é a média da umidade relativa (em % \* 0,01);  $k_{RH}$  é o fator relacionado a umidade relativa, de acordo com o cimento utilizado;  $CO_2$  é a concentração atmosférica de  $CO_2$  (em %);  $k_{CO_2}$  é o fator relacionado ao conteúdo de  $CO_2$  no ambiente, de acordo com o cimento utilizado; e  $k_{ce}$  é relacionado à exposição ao fator chuva, de acordo com as condições de exposição da estrutura.

O modelo matemático da Equação 9 apresenta variáveis de entrada facilmente obtidas, sendo elas: resistência à compressão, tipo de cimento, tipo e teor de adições pozolânicas empregadas, conteúdo de  $CO_2$  no ambiente de exposição, umidade do ar e exposição ao ambiente da estrutura (interno ou externo, protegida ou não da ação da chuva) (POSSAN; FELIX; THOMAZ, 2016). Além disso os fatores  $k_c$ ,  $k_{fc}$ ,  $k_{ad}$ ,  $k_{UR}$ ,  $k_{CO_2}$ ,  $k_{ce}$  são obtidos diretamente através de tabelas presentes em Possan *et al.* (2016), desenvolvidas após anos de estudos.

Martins *et al.* (2018) utilizaram em sua pesquisa o modelo proposto por Possan *et al.* (2016), para avaliar o avanço da frente de carbonatação ao longo dos anos do graute com diferentes resistências à compressão. Com a aplicação do mesmo, obtiveram de forma direta a estimativa da vida útil para cada mistura. Mas além disso, realizaram também o ensaio de carbonatação acelerada, como

forma de observar o desenvolvimento da frente de carbonatação ao longo do tempo e comprovar a aplicabilidade do modelo. Ao final da pesquisa observou-se que os resultados encontrados para o ensaio acelerado foram compatíveis com os previstos na modelagem, confirmando a boa representatividade do modelo.

Além dos modelos empíricos apresentados anteriormente existem na literatura diversos outros modelos com a finalidade de estimar a profundidade de carbonatação relacionados aos fatores que a influenciam (JIAO; DIAO; WANG, 2016; SHAH; BISHNOI, 2018; ZHANG *et al.*, 2013). No entanto, Ekolu (2016) salienta que estudos futuros relacionados principalmente à modelagem empírica, combinando os diferentes fatores de influência, podem estender o entendimento atual de carbonatação e previsão de vida útil, e contribuir para o desenvolvimento de modelos com resultados ainda mais promissores.

## **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho apresentou uma revisão da literatura sobre o processo de carbonatação em elementos de concreto. Através dela evidenciou-se que a compreensão deste fenômeno é fundamental para garantir a vida útil e durabilidade das estruturas em concreto armado. Por outro lado, por se tratar de um fenômeno que pode ser afetado por diferentes fatores internos (propriedades do concreto) e externo (condições ambientais) seu entendimento nem sempre é abrangente.

Muitos estudos ao longo dos anos buscaram, através de ensaios acelerados e modelos matemáticos empíricos, estimar a profundidade de carbonatação e assim determinar a vida útil do concreto. A dificuldade está em obter total sucesso na transposição do que é estimado com o que ocorre no ambiente real. É evidenciado que metodologias mais complexas, que consideram maior número de variáveis são mais representativas. Por outro lado, nem sempre são de fácil aplicação e servem para diferentes tipos de estudos.

É importante, a partir do exposto, ressaltar a importância da utilização de modelos matemáticos, ou a combinação de modelos e ensaios acelerados de

forma a auxiliar na escolha da melhor metodologia a ser aplicada. Esse processo, deve levar em consideração a finalidade da pesquisa a ser realizada e a disponibilidade de ferramentas de aplicação. Por fim, conclui-se que a busca pelo entendimento dos vários fatores que governam o processo de carbonatação, através de pesquisas técnicas, é fundamental para compreendê-lo. Essa compreensão, permitirá melhorar os modelos de previsão de vida útil, de forma a auxiliar na prevenção da degradação de estruturas.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15575-1 - Edifícios Residenciais. - Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais.** [S.l.], 2013.
- AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4, p. 459 – 471, 2003.
- ANN, K. *et al.* Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 8, p. 1494 – 1501, 2010. ISSN 0950-0618.
- BALAYSSAC, J.; DÉTRICHÉ, C.; GRANDÉ, J. Effects of curing upon carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 2, p. 91 – 95, 1995. ISSN 0950-0618.
- BERNAL, S. *et al.* Accelerated carbonation testing of alkali-activated slag/metakaolin blended concretes: effect of exposure conditions. **Materials and Structures**, p. In press, 03 2014.
- BERTOS, M. F. *et al.* A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 3, p. 193 – 205, 2004. ISSN 0304-3894.
- CHEN, Y.; LIU, P.; YU, Z. Effects of environmental factors on concrete carbonation depth and compressive strength. **Materials**, v. 11, p. 2167, 11 2018.
- CHI, M.; HUANG, R.; YANG, C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, p. 14–20, 01 2002.
- CUI, H. *et al.* Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 522 – 527, 2015. ISSN 0950-0618.
- EKOLU, S. A review on effects of curing, sheltering, and CO<sub>2</sub> concentration upon natural carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 306 – 320, 2016. ISSN 0950-0618.

HUSSAIN, S.; BHUNIA, D.; SINGH, S. Assessment of carbonation depth under natural and accelerated carbonation conditions. **Indian Concrete Journal**, 01 2016.

HUSSAIN, S.; BHUNIA, D.; SINGH, S. Comparative study of accelerated carbonation of plain cement and fly-ash concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 26 – 31, 2017. ISSN 2352-7102.

JIAO, J.; DIAO, B.; WANG, C. The carbonation model of concrete structures and its application. In: **International Conference on Civil, Transportation and Environment**. [S.l.: s.n.], 2016.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 744 – 753, 2006. ISSN 0950-0618.

LEEMANN, A.; MORO, F. Carbonation of concrete: the role of CO<sub>2</sub> concentration, relative humidity and CO<sub>2</sub> buffer capacity. **Materials and Structures**, v. 50, p. 30, 08 2016.

LU, C. *et al.* Effects of micro-environmental climate on the carbonation depth and the ph value in fly ash concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 309 – 317, 2018. ISSN 0959-6526.

MARANGU, J. M.; THIONG, J.; MUTHENGIA, W. Review of carbonation resistance in hydrated cement based materials. **Journal of Chemistry**, Volume 2019, 01 2019.

MARTINS, R. O. G. *et al.* Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 261 – 268, 2018. ISSN 0950-0618.

MONTEIRO, I. *et al.* Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 263 – 269, 2012. ISSN 0950-0618.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. CO<sub>2</sub> uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, 2016. ISSN 2365-3167.

POSSAN, E. *et al.* CO<sub>2</sub> uptake potential due to concrete carbonation: A case study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 6, p. 147 – 161, 2017. ISSN 2214-5095.

QIU, Q. A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118503, 2020. ISSN 0950-0618.

RAO, N. V.; MEENA, T. A review on carbonation study in concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IOP Publishing, v. 263, p. 032011, nov 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1757-899x%2F263%2F3%2F032011>>.

ROSTAMI, V. *et al.* Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 186 – 193, 2012. ISSN 0008-8846.

SHAH, V.; BISHNOI, S. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 219 – 232, 2018. ISSN 0950-0618.

SHU, Z. *et al.* Predicting method for time-dependent concrete carbonation depth (i): Traditional model and its error distribution. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 18, p. 2297–2308, 2013.

TORGAL, F. P. *et al.* An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of scms and/or rac. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 141 – 150, 2012. ISSN 0950-0618.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Tese (Doutorado) — Division of Building Materials, 1982.

WANG, W. *et al.* Predicting method for time-dependent concrete carbonation depth (ii): Improved empirical simulating formula. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 18, p. 2309–2322, 01 2013.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. de S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 213 – 288, 2011. ISSN 1678-8621.

YOUNSI, A. *et al.* Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 10, p. 993 – 1000, 2011. ISSN 0958-9465.

ZHANG, Q. Mathematical modeling and numerical study of carbonation in porous concrete materials. **Applied Mathematics and Computation**, v. 281, p. 16 – 27, 2016. ISSN 0096-3003.

ZHANG, X. *et al.* Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability. **Applied Clay Science**, v. 79, p. 36–40, 2013. Applied soil mechanics Engineering.