

SUBMETIDO 08/06/2021

APROVADO 15/09/2021

PUBLICADO ON-LINE 14/10/2021

PUBLICADO 30/03/2023

EDITOR ASSOCIADO
André Luís Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6023>

ARTIGO ORIGINAL

Carbonatação natural e modelos de previsão para concretos de cimento Portland: uma revisão

 Glauco Fonsêca Henriques ^[1]

 Jennef Carlos Tavares ^{[2]*}

 Antonio Dias de Lima
Terceiro Neto ^[3]

[1] glaucofh@gmail.com

[3] terceiro_netobsf@hotmail.com

Universidade Federal da
Paraíba (UFPB), Brasil

[2] jennef.carlos@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do
Semi-Árido (UFERSA), Brasil

RESUMO: Frente à importância de compreensão dos problemas causados pela carbonatação, despassivação e corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado, modelos de previsão de vida útil vêm sendo desenvolvidos para descrever adequadamente o progresso dessa degradação, cada qual com suas variáveis e melhores condições de aplicação. Logo, a presente pesquisa objetivou realizar uma revisão literária nacional acerca do fenômeno da carbonatação, no intuito de relacionar a aderência de alguns modelos de previsão da frente carbonatada do concreto com estudos de propagação natural, além de indicar a relevância, as diferenças e as premissas desses modelos. Assim, a metodologia se pautou em fazer uma seleção dos trabalhos de carbonatação em campo no Catálogo de Teses e Dissertações do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, buscando as pesquisas publicadas entre os anos 2000 e 2019, com foco em medidas naturais de deterioração, para uma posterior comparação com modelos de previsão citados na literatura. Como resultado, foram selecionados cinco modelos de previsão da carbonatação e dois estudos com carbonatação natural para se verificar a aderência dos modelos. Entre as variáveis que mais influenciaram nos modelos de previsão, podem-se destacar: relação a/c; tipo de cimento e adição; concentração de CO₂; umidade relativa; e temperatura. No rol, a relação a/c é a mais comumente utilizada. Portanto, conclui-se que cada modelo tem suas variáveis particulares relacionadas às características do concreto e às condições ambientais, o que dificulta sua generalização em campo, mas que são de extrema importância e podem apresentar grande parcela de relevância de acordo com as situações e dados locais que melhor se aplicam.

Palavras-chave: corrosão; durabilidade; vida útil.

Natural carbonation and prediction models for Portland cement concrete: a review

ABSTRACT: Given the importance of understanding the problems caused by

*Autor para correspondência.

carbonation, depassivation and corrosion of reinforcement in reinforced concrete structures, service life prediction models have been developed to adequately describe the progress of this degradation, each one with its variables and best application conditions. Therefore, this research aimed to conduct a national literary review on the phenomenon of carbonation, in order to relate the adherence of some prediction models of the carbonated concrete front with natural propagation studies, in addition to indicating the relevance, differences and assumptions of these models. Thus, the methodology was based on making a selection of carbonation works in the field in the CAPES theses and dissertations catalog, seeking studies published between 2000 and 2019, focusing on natural measures of deterioration for later comparison with the aforementioned forecast models. in literature. As a result, five carbonation prediction models and two studies with natural carbonation were selected to verify the models' adherence. Among the variables that most influenced the forecasting models, the following can be highlighted: w/c ratio, type of cement and addition, CO₂ concentration, relative humidity and temperature, with the w/c ratio being the most common to be used. Therefore, it is concluded that each model has its particular variables related to the characteristics of the concrete and environmental conditions, which makes it difficult to generalize in the field, but which are extremely important and can have a substantial portion of relevance according to local situations and data which best apply.

.....
Keywords: corrosion; durability; service life.

1 Introdução

O concreto tem proporcionado a engenheiros e arquitetos a capacidade de projetar e construir edifícios com maiores funcionalidades, sendo usado, assim, em grandes quantidades. Mas, com o passar do tempo, verificou-se que essas estruturas se degradam e que a carbonatação é um dos processos que pode contribuir para tal fenômeno, a qual acontece devido à absorção do dióxido de carbono pelo concreto (HILLS *et al.*, 2015). À medida que essa frente de carbonatação percorre todo o cobrimento de concreto e atinge o interior da estrutura, ocorre a despasseivação da armadura, começando assim o processo de corrosão, que é outra causa de deterioração das estruturas.

Desse modo, entende-se a carbonatação do concreto como a reação química do Ca(OH)₂, que é um produto da hidratação do cimento, com o CO₂ presente na atmosfera. Como resultado, forma-se o carbonato de cálcio (CaCO₃), o qual reduz o valor do pH do concreto para cerca de 8,3 (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1991). Esse processo geralmente ocorre em uma área urbana com alto nível de dióxido de carbono, emitido por veículos e fábricas industriais (ACI, 1994).

Para a medida da profundidade de carbonatação, empregam-se soluções indicadoras de pH, as quais apresentam mudanças de coloração em determinadas faixas de pH. A mais empregada é a solução de fenolftaleína a 1% em álcool etílico. Essa solução, que é incolor a princípio, é aspergida no concreto e assume a cor roxo-púrpura se o pH é superior a 9,5; ganha uma cor que vai do rosa ao roxo-púrpura, para pHs entre 8 e 9,5; e se mantém incolor se o pH é inferior a 8 (ANDRADE, 1989). Emprega-se também a solução indicadora de timolftaleína a 1% em álcool etílico. Esta assume a cor azul quando o pH é maior que 10,3 e se mantém incolor para pHs mais baixos que esse referencial (MEIRA, 2017). Existem também outros tipos de soluções

empregadas, como amarelo de alizarina GG, a qual apresenta uma faixa de viragem de pH de 10,1 a 12 (PEREIRA, 2003).

Com relação ao preparo dos corpos de prova (CPs), estudos experimentais sobre carbonatação foram realizados por vários pesquisadores, porém Saetta, Schrefler e Vitaliani (1993) os juntaram a um modelo de difusão unidimensional para calor, umidade e fluxo de CO₂, o qual foi, mais adiante, exposto em uma extensão bidimensional também por Saetta, Schrefler e Vitaliani (1995). Um exemplo dessa preparação dos CPs foi realizado por Farias (2019), no qual foram feitos ensaios acelerados de penetração de CO₂ em CPs cúbicos (10 cm de aresta) com quatro faces seladas à base de tinta poliuretano acrílico alifático, deixando apenas duas faces opostas livres para carbonatação, o que proporciona sentido unidirecional de difusão do CO₂.

Nesse sentido, muitos pesquisadores analisam o fenômeno da carbonatação por diferentes formas, como os modelos teóricos de previsão da constante de carbonatação para diversos ambientes (HUANG; CHANG; LIANG, 2012; SISOMPHON; FRANKE, 2007; TA *et al.*, 2016). Entre os métodos adotados para previsão da vida útil, estudos nacionais fizeram compilações; como exemplo, podem ser citados os estudos de Carmona (2005), Possan (2010) e Ferreira (2013). Com base na revisão de literatura, foram escolhidos os seguintes modelos para a presente pesquisa: Hamada (1969), Vesikari (1988), Bob e Afana (1993), Morinaga (1990) e Possan (2010).

Vale ressaltar que, nas últimas décadas, face aos problemas de degradação, novidades competitivas e exigências de sustentabilidade em relação à construção civil e estruturas de concreto armado, verifica-se uma tendência mundial à elaboração de projetos voltados à durabilidade e extensão da vida útil, entre os quais os modelos de previsão da frente carbonatada se destacam, principalmente pela importância da compreensão do progresso do fenômeno da corrosão de armaduras (POSSAN, 2010). Porém, conforme ocorrem estudos e avanços tecnológicos sobre o tema, novos modelos de previsão são desenvolvidos de acordo com novos fatores e premissas de aplicação.

Mediante o exposto, e com base nos inúmeros modelos pré-existentes para estimar a profundidade de carbonatação em concretos de cimento Portland, constatou-se a lacuna sobre a verificação da aderência desses métodos entre si e em relação aos casos reais. Assim, o objetivo deste trabalho consiste em apresentar uma revisão sistemática da literatura, de acordo com os repositórios de teses e dissertações nacionais, referente à carbonatação em concretos de cimento Portland, com foco em modelos teóricos da previsão da profundidade carbonatada em relação ao desempenho do concreto, como também fazer simulações e correlações de um mesmo concreto nos modelos estudados, no intuito de verificar se existe aderência entre o resultado das carbonatações previstas e a carbonatação natural observada em campo, além de indicar a relevância, as diferenças e as premissas desses modelos de previsão selecionados.

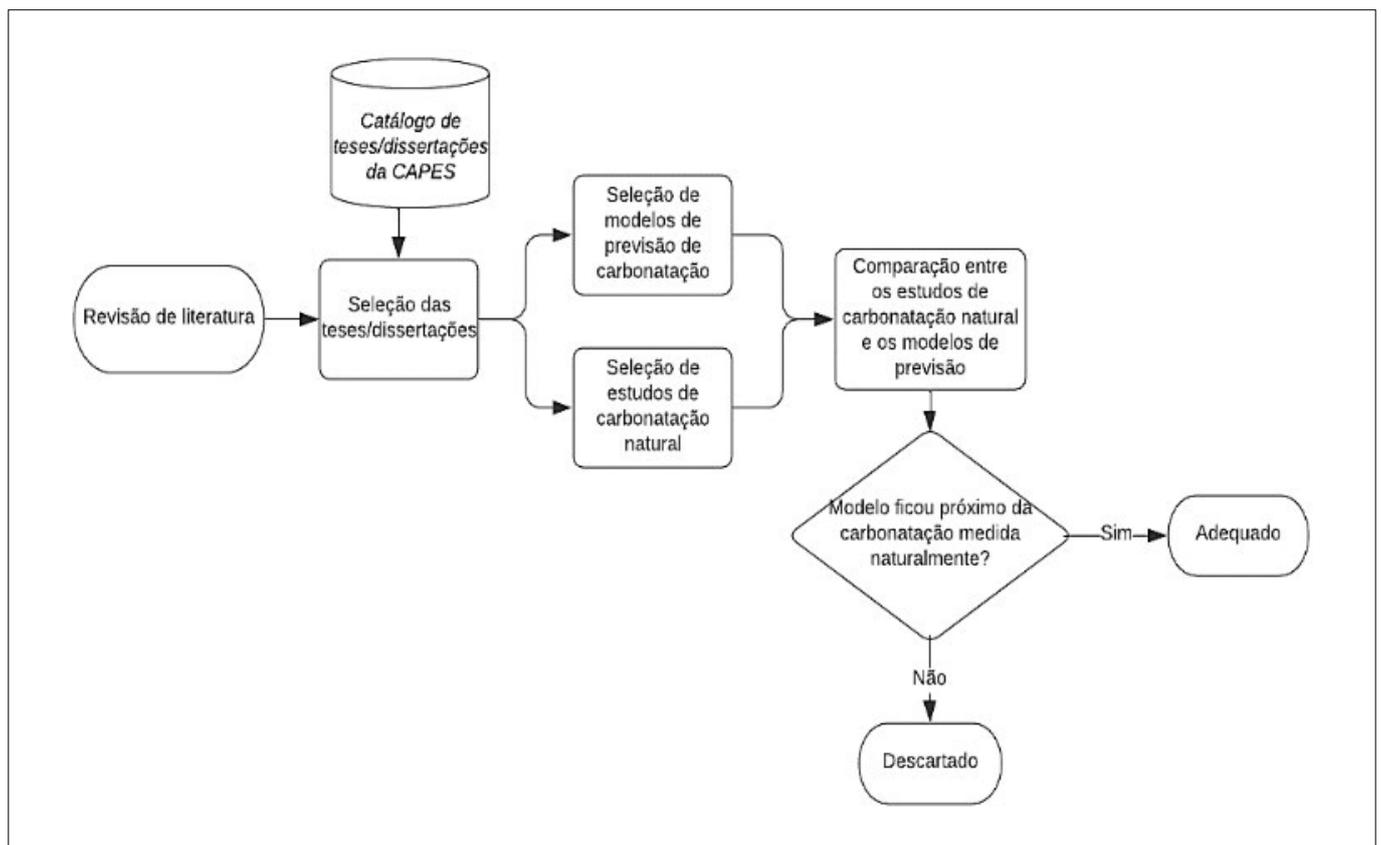
Nas seções posteriores, serão apresentados: metodologia da pesquisa, contendo os princípios da revisão sistemática da literatura para escolha dos modelos de previsão da profundidade carbonatada em concretos, como também os procedimentos metodológicos para seleção dos estudos práticos de medições da carbonatação natural; pesquisas nacionais sobre carbonatação no século XXI, buscando identificar a distribuição dos estudos e modelos relacionados à carbonatação nos anos 2000-2019; modelos de previsão e estudos de medição natural de carbonatação em concretos, contendo o detalhamento dos modelos e estudos naturais escolhidos para análise neste artigo, respectivamente; resultados, apresentando os gráficos de previsão da frente carbonatada nos concretos e verificando a aderência entre o resultado das carbonatações previstas e a carbonatação medida naturalmente nos estudos objeto; e

por fim, as conclusões do artigo, sintetizando os principais resultados encontrados e demonstrando a importância do estudo.

2 Referencial teórico

Para realização do presente estudo, foram seguidas as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 1. Ao final, para desenvolvimento do estudo, foram selecionados cinco modelos de previsão da carbonatação: Hamada (1969), Vesikari (1988), Bob e Afana (1993), Morinaga (1990) e Possan (2010); e dois estudos com carbonatação natural: Carmona (2005) e Ferreira (2013), para se verificar a aderência dos modelos.

Figura 1 ▼
Fluxograma do método do trabalho.
Fonte: elaborado pelos autores (2021)



2.1 Revisão sistemática da literatura

Para realização da revisão sistemática da literatura nacional sobre carbonatação no concreto, utilizou-se, como banco de dados, o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, o qual apresenta todos os trabalhos dos programas de pós-graduação nacionais, principal fonte de pesquisa do Brasil, que resultaram em teses ou dissertações.

A *string* de busca principal para a pesquisa foi “carbonatação”. Entretanto, este estudo se valeu também de outros filtros disponibilizados pela ferramenta para refinar a busca, tais como: ano de indexação, em que foi marcado o período entre 2000 e 2019,

com o intuito de restringir o estudo da arte sobre o tema ao século XXI; e área de avaliação, no qual foi marcado “Engenharias 1”.

2.2 Seleção dos modelos de previsão de carbonatação

Ao finalizar a busca no banco de dados, partiu-se para a seleção dos modelos de previsão da profundidade de carbonatação. Para realização dessa etapa, foram verificados, nos trabalhos resultantes da busca, quais os modelos mais citados ou utilizados pelos autores.

Esses modelos ainda passaram por uma etapa de elegibilidade, na qual deviam atender aos seguintes critérios para entrar neste estudo:

- usar variáveis físicas e mecânicas do concreto, e;
- abranger características ambientais, como teor de CO₂ e umidade relativa do ar, que estão diretamente relacionadas a carbonatação.

2.3 Seleção dos estudos de carbonatação natural

Nessa etapa, foram selecionadas, entre os trabalhos resultantes da busca no banco de dados, duas pesquisas práticas que verificassem a carbonatação natural do concreto ao longo do tempo. Como critérios de elegibilidade, foram utilizados os seguintes:

- pesquisas realizadas em instituições diferentes;
- uma pesquisa realizada na primeira década do século e uma na segunda;
- concreto exposto há 10 anos ou mais; e
- disponibilidade dos dados que são utilizados nos modelos, como os mencionados no tópico anterior.

2.4 Comparação entre os estudos de carbonatação natural e os modelos de previsão

Na última etapa, foram realizadas comparações entre a profundidade de carbonatação natural encontrada pelos autores em suas pesquisas e a carbonatação prevista pelos modelos selecionados ao serem aplicadas as características do concreto e as ambientais referentes às duas pesquisas práticas.

Ao fim, pretendeu-se identificar quais modelos mais se adequavam às situações locais das pesquisas, sendo que um modelo seria considerado aceitável caso previsse uma profundidade de carbonatação próxima à natural identificada pelos autores.

3 Pesquisas nacionais sobre carbonatação no século XXI

Esta revisão procurou identificar as pesquisas realizadas nas universidades brasileiras no século XXI que tratassem sobre a carbonatação do concreto, como também verificar os modelos de previsão de carbonatação mais utilizados na literatura nacional, para que

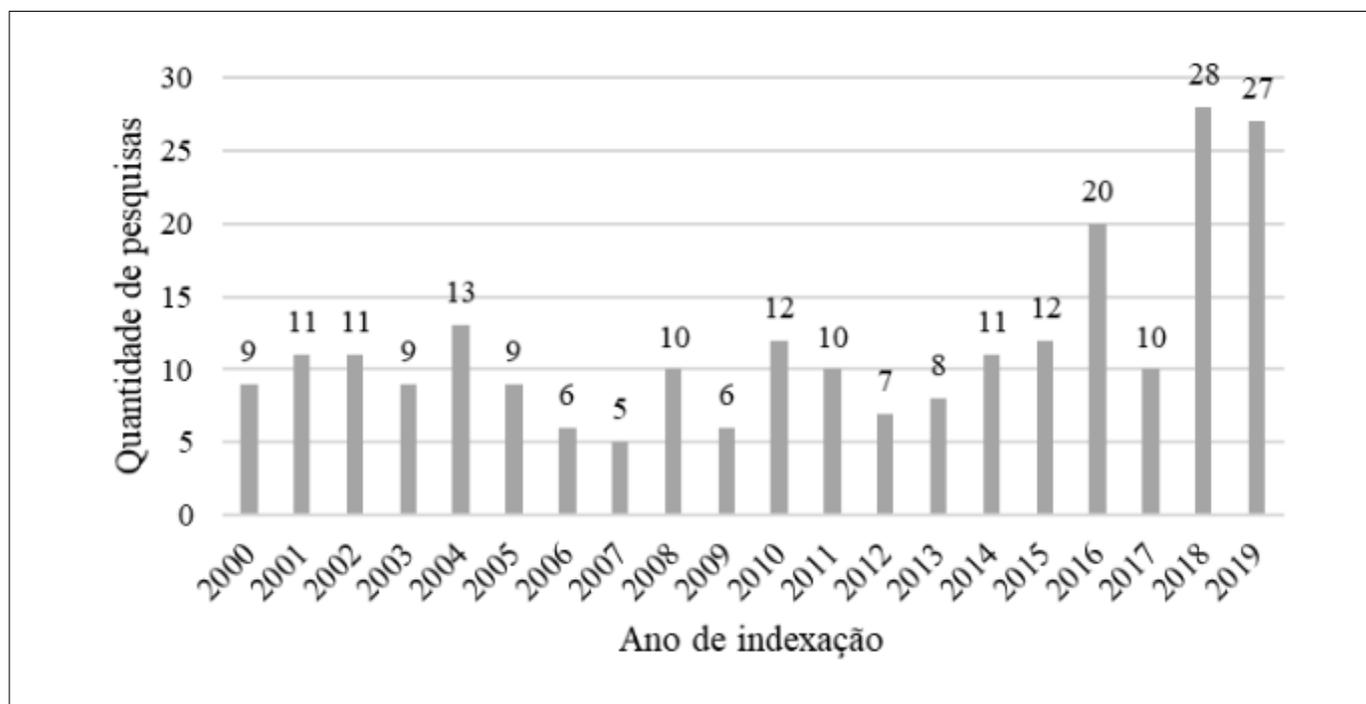
fosse possível realizar uma comparação entre a previsão e a medida da profundidade de carbonatação natural ao longo do tempo.

Figura 2 ▼

Quantidade de produções acadêmicas por ano.

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Ao ser aplicada a *string* de busca “Carbonatação” no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, foram obtidos 437 resultados, sendo 341 dissertações e 96 teses. Posteriormente, ao utilizar os filtros para refinar a ferramenta de busca, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 2.



De acordo com a Figura 2, observa-se um total de 234 pesquisas realizadas no Brasil entre 2000 e 2019 sobre carbonatação. Dessas, 201 são provenientes de dissertações e 33 são oriundas de teses, em que o foco principal consistiu na análise de ensaios de carbonatação acelerados, não sendo esse o objetivo da presente pesquisa. Pode-se observar também que os anos que tiveram mais pesquisas sobre carbonatação foram 2018, 2019, 2016 e 2004, respectivamente. Além disso, foi possível identificar, com esse levantamento, que as universidades que mais pesquisaram sobre o tema foram: UFG (26), UFSM (26), UFRGS (19), USP (18) e UFMG (18).

4 Modelos de previsão da carbonatação de concretos

Conforme os critérios estabelecidos na metodologia, selecionaram-se os modelos de previsão da frente carbonatada em concretos em função do tempo, os quais estão apresentados no Quadro 1 (página seguinte), no qual é feita uma breve revisão sobre cada um.

Em geral, nota-se que, com relação aos modelos selecionados, todos consideram, em suas equações, variáveis que refletem as características físicas e mecânicas do concreto, como a relação água/cimento (a/c) e a resistência à compressão. Aqueles mais

Quadro 1 ▼

Explicação dos modelos selecionados de previsão da profundidade carbonatada e suas variáveis.

Fonte: dados da pesquisa (2021)

recentes, a partir de 1990, consideram também variáveis que representam condições ambientais, como a umidade relativa, a temperatura e o teor de CO₂ do ambiente.

Modelo	Equações envolvidas	Variáveis envolvidas
Hamada (1969)	$e_c = \frac{R}{\sqrt{k}} t, \text{ para}$ $k = \frac{0,30 * (1,15 + 3 * a/c)}{(a/c - 0,25)^2}$ $R = r_c * r_a * r_s$	<p>e_c, profundidade de carbonatação (cm); t, tempo de exposição (anos); k, coeficiente em função de a/c; a/c, relação água/cimento; e R, coeficiente em função do tipo de cimento, tipo de agregado e uso de aditivos.</p>
Vesikari (1988)	$e_c = k \sqrt{t}$ $k = 26(a/c - 0,3)^2 + 1,6$	<p>k, coeficiente de carbonatação ($mm/ano^{0,5}$); a/c, relação água/cimento; limites de aplicação: $0,45 < a/c < 0,75$. Para ambiente externo desprotegido, multiplicar o k por 4.</p>
Bob e Afana (1993)	$e_c = 150 * \left(\frac{c * k * d}{f_c} \right) \sqrt{t}$	<p>e_c, profundidade de carbonatação (mm); t, tempo de exposição (anos); c, coeficiente em função do tipo de cimento; k, coeficiente em função da umidade relativa; d, coeficiente em função da quantidade de CO₂ estipulada do ambiente; e f_c, resistência à compressão do concreto (MPa).</p>
Morinaga (1990)	$x_c = \left(\frac{C}{5} \right)^{0,5} * 2,44 * (1,391 - 0,174 HR + 0,0217 T) * (4,6 W - 1,76) * \sqrt{t}; a/c \leq 0,6$ $x_c = \left(\frac{C}{5} \right)^{0,5} * 2,44 * (1,391 - 0,174 HR + 0,0217 T) * \left[\left(\frac{4,9 * W - 0,25}{(1,15 + 3 W)^{0,5}} \right) * \sqrt{t}; \frac{a}{c} > 0,6 \right]$	<p>x_c, profundidade de carbonatação (mm); t, tempo de exposição (dias); w, relação água/cimento; C, concentração de CO₂ na atmosfera (%); HR, umidade relativa; e T, temperatura ambiental (°C).</p>
Possan (2010)	$e_c = k_c * \left(\frac{20}{f_c} \right)^{k_{fc}} * \left(\frac{t}{20} \right)^{0,5} * \exp \left[\left(\frac{k_{ad} * ad^{1,5}}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{k_{CO_2} * CO_2^{0,5}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{k_{UR} * (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] * k_{ce}$	<p>e_c, profundidade de carbonatação (mm); t, idade do concreto (anos); f_c, resistência característica à compressão axial do concreto (MPa); k_c, fator variável referente ao tipo de cimento empregado; k_{fc}, fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto em função do tipo de cimento utilizado; k_{ad}, fator variável referente às adições pozolânicas do concreto em função do tipo de cimento utilizado; ad, teor de adição pozolânica no concreto em % em relação à massa de cimento; k_{CO_2}, fator variável referente ao teor de CO₂ do ambiente em função do tipo de cimento utilizado; CO_2, teor de CO₂ da atmosfera (%); k_{UR}, fator variável referente à umidade relativa em função do tipo de cimento utilizado; UR, umidade relativa média (%*0,01); e k_{ce}, fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura.</p>

Além disso, alguns modelos consideram coeficientes referentes à dosagem do concreto e materiais utilizados, como tipo de cimento e agregados, teores de adições pozolânicas, uso de aditivos etc. Por fim, nota-se também que apenas o modelo mais antigo (HAMADA, 1969) está linearmente relacionado em função do tempo, enquanto os demais foram desenvolvidos na forma potencial (raiz quadrada do tempo).

5 Estudos de medição natural de carbonatação

De acordo com o procedimento descrito na metodologia, foram selecionadas duas pesquisas nacionais de medição natural de carbonatação: Carmona (2005) e Ferreira (2013). Os resultados dessas pesquisas, que são apresentados a seguir, foram utilizados para comparação com os modelos teóricos.

5.1 Estudo de Carmona

Carmona (2005) realizou um trabalho experimental que objetivou contribuir para o conhecimento sobre a variabilidade da carbonatação e dos cobrimentos por meio de um estudo de caso prático de uma estrutura, mais precisamente o subsolo de um edifício residencial na zona central da cidade de São Paulo-SP.

O edifício estudado foi o Condomínio Edifício Flávia, situado na Alameda Itu, o qual possuía 30 anos de idade no tempo da pesquisa. As garagens, objeto do estudo, eram constituídas por um único andar dois metros abaixo do nível da rua e apresentavam pouca ventilação, além de terem o piso apoiado diretamente sobre o solo.

Para a execução do estudo, foram realizadas medidas de profundidade de carbonatação, de cobrimentos de armaduras, de concentração de CO₂ no ambiente e de umidade relativa do ar em pórticos transversais compostos por pilares e vigas, sendo as mensurações feitas no topo, no meio e na base dos pilares, assim como nos apoios e centros das vigas.

Primeiramente, foram detectadas as posições das armaduras por meio da utilização de um pacômetro da marca Bosch. Posteriormente, procedeu-se à extração localizada do concreto na região até o encontro da armadura. Após a extração, a superfície foi limpa para a remoção do pó e aspergida com solução de fenolftaleína, de acordo com a norma UNE 112011 (AENOR, 2011). Finalmente, a profundidade de carbonatação máxima em cada ponto foi medida com a utilização de um paquímetro.

De posse dos dados da profundidade de carbonatação, realizaram-se, nos mesmos locais, medidas da umidade relativa do ar e da concentração de CO₂ do ambiente, por meio do uso de *Thermo Hygrometer*, da marca Kiltler, e de equipamento portátil da marca Neotronics, respectivamente. Os resultados obtidos por Carmona (2005), os quais foram utilizados no presente estudo, são apresentados na Tabela 1 (página seguinte).

Tabela 1 ▶

Dados de Carmona (2005) utilizados neste estudo.

Fonte: dados da pesquisa (2021)

Características do concreto e dos materiais	Profundidade de carbonatação (mm)	Umidade relativa do ar (%)	Concentração de CO ₂ do ambiente (%)
Massa unitária do cimento = 1.230 kg/m ³			
Massa unitária dos agregados = 1.500 kg/m ³			
Tempo de cura = 3 dias	33	67,5	1,3
CaO = 65% CPI			
$f_{ck} = 20$ MPa			
$a/c = 0,75$			

Vale salientar que os valores apresentados na Tabela 1 são referentes às medidas no meio do pilar, as quais representam a situação mais crítica na estrutura. Isso ocorre porque, na base e no topo dos pilares, existe uma maior concentração de umidade, o que dificulta a difusão de CO₂ e diminui a velocidade de carbonatação.

5.2 Estudo de Ferreira

Em seus estudos, Ferreira (2013) verificou a tendência do avanço da frente de carbonatação natural, com uso de indicador à base de fenolftaleína, ao longo de 10 anos de exposição. Foram realizadas medidas com os tempos de exposição de 91 dias, 182 dias, 301 dias, 3 anos, 7 anos, 9 anos e 10 anos em CPs de concreto de cimento Portland, com diferentes adições minerais (sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz, cinza volante, escória de alto-forno e concreto referência – sem adições), tendo em vista três relações água/cimento (0,40, 0,55 e 0,70) e dois processos de cura (úmida e seca). Um dos objetivos da pesquisa consistiu em verificar e ajustar as melhores funções matemáticas para representar o comportamento natural das profundidades carbonatadas, em função do tempo, para os diversos concretos com suas variáveis.

Conforme Ferreira (2013), os CPs que foram utilizados para a avaliação da carbonatação natural eram prismáticos com dimensões de 200 mm x 200 mm x 500 mm, armados com quatro barras longitudinais em aço CA-50 de diâmetro nominal de 10 mm e quatro estribos em aço CA-60 de 5 mm. As barras longitudinais foram posicionadas de forma a garantirem o cobrimento de 25 mm. Os CPs prismáticos foram elaborados de modo a reproduzirem características similares às de uma peça de concreto armado real, tanto com armadura quanto com utilização de formas de madeira compensada de 12 mm resinada.

Ainda segundo Ferreira (2013), após a finalização da moldagem, os CPs produzidos foram mantidos por cerca de 36 horas no ambiente de laboratório. Aqueles que seguiriam com cura úmida foram cobertos com sacos de aniagem umedecidos; os que iriam para cura seca (ao ar) foram deixados dentro das formas, sem cobertura ou proteção, sendo, em seguida, desenformados e levados para a condição de cura predefinida: em câmara úmida, com temperatura de (23 + 2) °C e umidade superior a 90%, permanecendo até a idade de 28 dias; ou diretamente no ambiente de cura ao ar.

Então, os CPs foram alocados em um ambiente externo (em tendas) dentro das instalações do Departamento de Apoio e Controle Técnico da empresa Eletrobras Furnas, na cidade de Aparecida de Goiânia-GO, até as datas das avaliações, ocorridas durante o período de 10 anos após sua confecção. Considerou-se o local de armazenamento como um ambiente externo abrigado e protegido.

Com relação às condições e variáveis climáticas do lugar, Ferreira (2013) apresentou valores monitorados de temperatura e de umidade relativa do ambiente onde se mantiveram os CPs em envelhecimento natural. Segundo o autor, teve-se um clima com períodos sazonais bem definidos – chuvoso e seco – e temperaturas sem excessivas variações ao longo do ano.

Para utilização das equações de previsão, foi necessária a este trabalho a filtragem dos dados e das considerações fornecidas por Ferreira (2013), entre todas as informações disponíveis. No Quadro 2, os dados utilizados nas equações e seus valores respectivos são indicados.

Quadro 2 ▼

Dados de Ferreira (2013) utilizados para formular as equações dos modelos de previsão da carbonatação, classificados por modelo e variável relacionada.
Fonte: dados da pesquisa (2021)

Dados	Modelos relacionados	Variáveis relacionadas
Relação a/c	Hamada (1969)	a/c = 0,40; 0,55; 0,70
	Vesikari (1988)	
	Morinaga (1990)	
Concretos dosados com areia natural de leito de rio	Hamada (1969)	ra = 1
Concretos dosados com aditivos plastificantes	Hamada (1969)	rs = 0,4
Concretos com cimento CP II F-32	Hamada (1969)	rc = 1
	Bob e Afana (1993)	C = 1,2
	Possan (2010)	kc = 21,68; kfc = 1,5; kad = 0,24; kCO ₂ = 18; kUR = 1100
Umidade relativa média anual do ambiente = 70%	Bob e Afana (1993)	k = 0,7
	Morinaga (1990)	HR = 70%
	Possan (2010)	UR = 70%
Quantidade de CO ₂ média no ambiente = 0,03%	Bob e Afana (1993)	D = 1
	Morinaga (1990)	C = 0,03%
	Possan (2010)	CO ₂ = 0,03%
Resistência do concreto à compressão (f _c)	Bob e Afana (1993)	f _c = 32,9 Mpa (para a/c = 0,40); 24,8 Mpa (para a/c = 0,55); 18,9 Mpa (para a/c = 0,70)
	Possan (2010)	
Temperatura média anual do ambiente = 25 °C	Morinaga (1990)	T = 25 °C
CPs em ambiente externo protegido	Possan (2010)	kce = 1
Teor de adição pozolânica do concreto	Possan (2010)	ad = 0%

Além disso, em sua apresentação de resultados, Ferreira (2013) mostrou o avanço da frente de carbonatação nos concretos e funções matemáticas ajustadas para representar o comportamento natural das profundidades carbonatadas em função do tempo. Para o presente artigo, o foco de análise será nos concretos de referência (sem adições) de cura seca (ao ar), sendo utilizados, dessa forma, os seguintes dados:

- Caso R40 (concreto sem adição, $a/c = 0,40$ e $fck = 32,9$ MPa): $y = 3,9561x^{0,3756}$ com $R^2 = 0,7615$;
- Caso R50 (concreto sem adição, $a/c = 0,55$ e $fck = 24,8$ MPa): $y = 5,8895x^{0,4616}$ com $R^2 = 0,9183$;
- Caso R70 (concreto sem adição, $a/c = 0,70$ e $fck = 18,9$ MPa): $y = 6,3811x^{0,5238}$ com $R^2=0,9243$;

Em geral, nota-se que as funções matemáticas que melhor representaram a carbonatação natural estão relacionadas de forma potencial com o tempo, por apresentarem melhor aderência às profundidades naturais medidas nos casos R50 e R70, com R^2 sendo 0,9183 e 0,9243, respectivamente, e uma maior dispersão no caso R40.

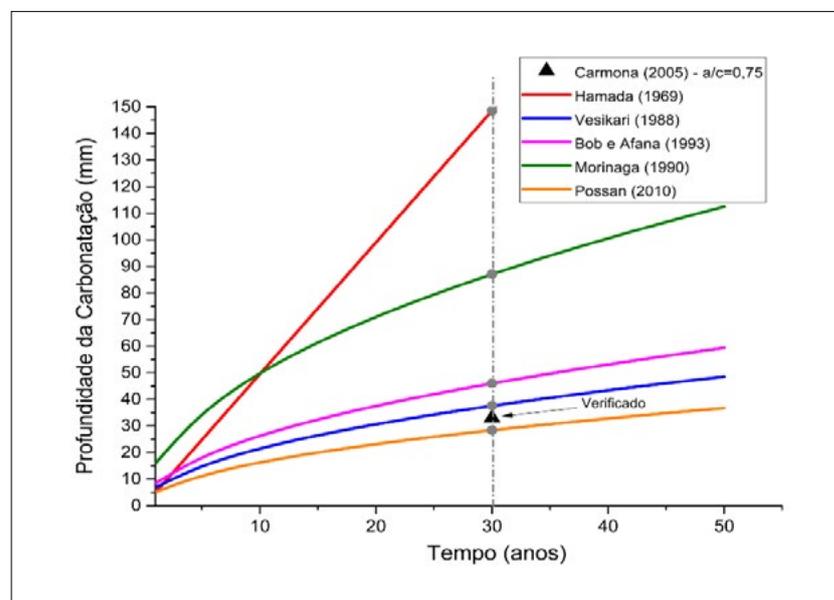
6 Resultados

Nesta seção, os resultados obtidos são discutidos com os dados de Carmona (2005) e Ferreira (2013).

6.1 Discussão dos dados de Carmona

A fim de se avaliar a aderência entre os cinco modelos selecionados de previsão da profundidade de carbonatação, conforme o Quadro 1, e os dados de carbonatação natural medidos por Carmona (2005), referentes a uma estrutura de concreto com 30 anos de idade, plotaram-se os dados no gráfico da Figura 3. Vale salientar que Carmona (2005) fez apenas uma medição da profundidade de carbonatação natural para os 30 anos, logo, a comparação entre os modelos foi realizada para essa idade.

Figura 3 ►
Carbonatação natural (CARMONA, 2005) versus modelos de previsão da profundidade de carbonatação para situação do cenário experimental, $a/c = 0,75$.
Fonte: dados da pesquisa (2021)



Como pode ser observado na Figura 3, para a idade de 30 anos, a estrutura analisada por Carmona (2005) apresentou uma profundidade de carbonatação de 33 mm. Quando comparada com os modelos de previsão para a mesma idade, observa-se que os modelos que apresentaram os melhores resultados foram o de Possan (2010), Vesikari (1988) e Bob e Afana (1993), os quais ficaram 4,9 mm abaixo, 4,3 mm e 12,7 mm acima do valor da profundidade de carbonatação natural, respectivamente. Portanto, os dois modelos mais aderentes para a situação encontrada no cenário de Carmona (2005) foram o de Vesikari (1988) e o de Possan (2010).

A aderência do modelo de Vesikari (1988) pode ser explicada pelo fato de o modelo depender estritamente da relação água/cimento (a/c), sendo aplicável em um intervalo de 0,45 até 0,75, o que se encaixa no cenário de Carmona (2005), o qual dispõe de uma estrutura com a/c de 0,75. Apesar de ter apresentado o melhor resultado, é válido dizer que o modelo de Vesikari (1988) não considera nenhuma variável ambiental, sendo isso um ponto negativo, já que fatores como umidade relativa do ar e teor de CO₂ do ambiente influem diretamente na carbonatação dos concretos.

Já Possan (2010) considera em seu modelo tanto variáveis relacionadas às características do material, como resistência à compressão e tipo de cimento, quanto variáveis relacionadas ao ambiente, como umidade relativa e teor de CO₂, as quais foram medidas por Carmona (2005). Portanto, pode-se considerar Possan (2010), entre os modelos analisados neste estudo, como o mais adequado para o cenário de Carmona (2005).

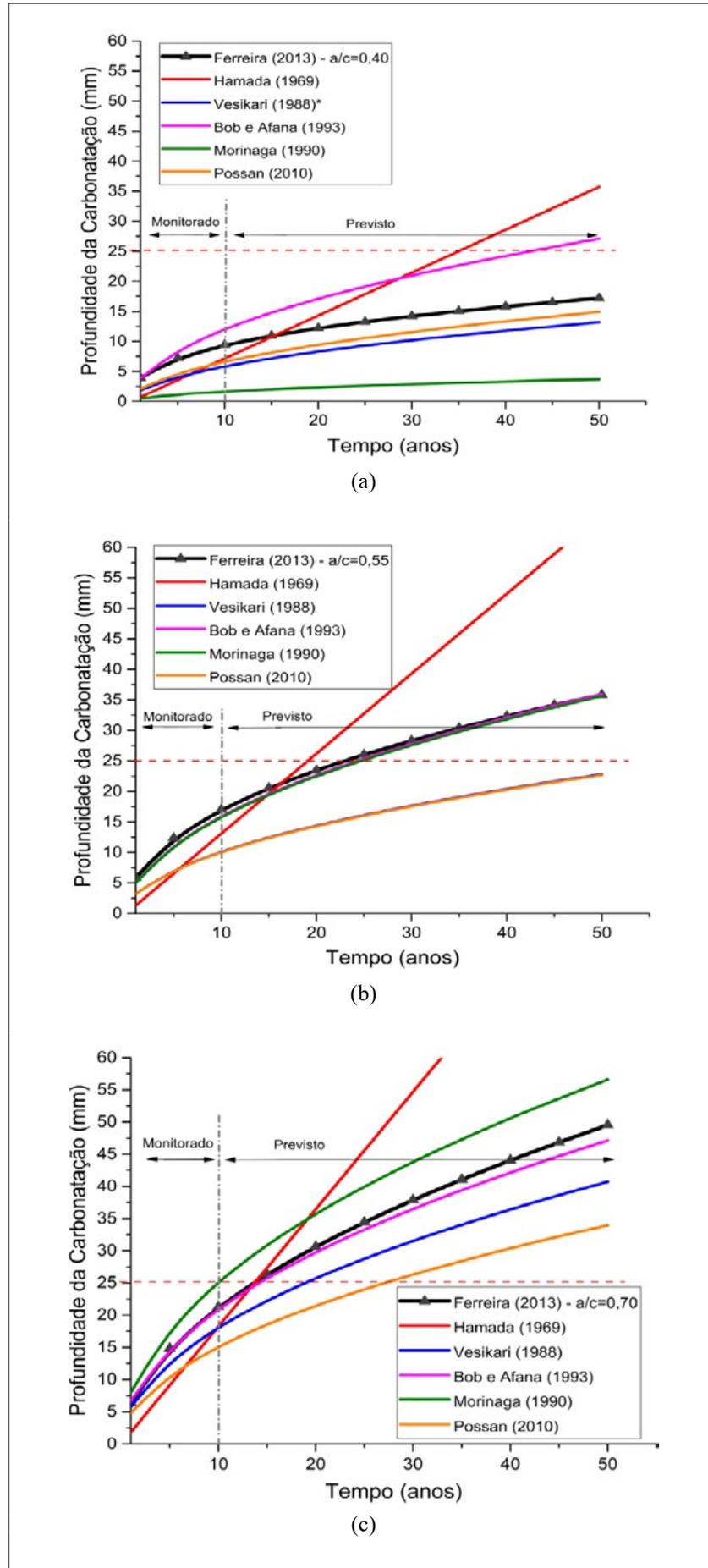
6.2 Discussão dos dados de Ferreira

Nesta seção, é avaliada a aderência entre os cinco modelos selecionados de previsão da profundidade de carbonatação, conforme o Quadro 1, e os dados de carbonatação natural, medidos por Ferreira (2013), para concretos de referência (sem adições minerais), com três relações a/c distintas (0,40; 0,55; 0,70) e curados ao ar, conforme descrito anteriormente.

Dessa forma, pela plotagem das equações formuladas de previsão da frente de carbonatação juntamente com as funções matemáticas ajustadas para representar o comportamento natural das profundidades carbonatadas, conforme Ferreira (2013), obteve-se a Figura 4 (página seguinte). Optou-se por expandir a análise para um tempo de 50 anos, levando-se em consideração o mínimo período de vida útil do sistema estrutural, conforme a norma de desempenho ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013).

Figura 4 ▶

Carbonatação natural (FERREIRA, 2013) versus modelos de previsão da profundidade de carbonatação para concreto de referência (sem adições), cura seca (ao ar) e relações (a) $a/c = 0,40$, (b) $a/c = 0,55$ e (c) $a/c = 0,70$.
 Fonte: dados da pesquisa (2021)



Dessa forma, pela análise dos gráficos da Figura 4, nota-se que, de forma geral, o aumento da relação a/c contribuiu para um aumento das profundidades da carbonatação natural e das previstas, pois, conforme já era esperado, há uma tendência de aumento da porosidade/permeabilidade do concreto à medida que se aumenta sua relação a/c , o que acarreta facilitar, dessa forma, o avanço da frente de carbonatação.

Além disso, nota-se também uma tendência de os modelos de previsão que utilizam equações em função da raiz do tempo (\sqrt{t}) serem mais representativos que aqueles lineares, o que corrobora a hipótese de Tuutti (1982), baseada na primeira lei de Fick, segundo a qual a profundidade carbonatada é bem estimada por meio da multiplicação de um coeficiente de carbonatação – o qual contempla a influência de diversas variáveis – pela raiz quadrada do tempo.

Pela análise individual de cada gráfico, para o caso da relação $a/c = 0,40$, na Figura 4(a), os modelos que apresentaram dados mais próximos aos dados de medição natural da carbonatação foram o de Possan (2010), com diferença em torno de -2,5 mm de profundidade prevista; e o de Vesikari (1988), com diferença em torno de -3,0 mm de profundidade prevista, mas que, por hipótese desse último, só poderia ser aplicado para relações a/c entre 0,45 e 0,75. Vale ressaltar que a função matemática que melhor representava a carbonatação natural para este caso apresentou $R^2 = 0,7615$, o que indica uma maior dispersão das profundidades naturais medidas em comparação com as outras situações analisadas.

Para o caso da relação $a/c = 0,55$, na Figura 4(b), os modelos de Morinaga (1990) e de Bob e Afana (1993) apresentaram ótima aderência com os dados de medição natural da carbonatação, pois exibiram, inicialmente, diferença em torno de -1,0 mm, medida esta que se torna irrisória quando analisada principalmente a partir de 30 anos de exposição, atingindo diferenças menores que meio milímetro.

Para o caso da relação $a/c = 0,70$, na Figura 4(c), o modelo de Bob e Afana (1993) apresentou ótima aderência com os dados de medição natural da carbonatação, já que indicou, inicialmente, uma diferença mínima maior que -1,0 mm, a partir de 23 anos de exposição, e maior que -2,0 mm, a partir de 43 anos de exposição. Na sequência, os modelos de Vesikari (1988) e de Morinaga (1990) também representaram bem a profundidade de carbonatação natural, com diferenças em torno de -5,0 mm e +5,0 mm para 20 anos de exposição e de -7,5 mm e +6,5 mm para 40 anos de exposição, respectivamente.

Dessa forma, pela análise geral, nota-se que os modelos mais aderentes à situação de estudo de Ferreira (2013) – ou seja, para a análise de concretos sem adições, curados ao ar e com relações a/c intermediárias (em torno de 0,55) – são o de Morinaga (1990) e o de Bob e Afana (1993), o que corrobora Bolina e Tutikian (2014), já que o modelo com a/c altas (em torno de 0,70) é o de Bob e Afana (1993). Observa-se também que, conforme o Quadro 2, tanto Morinaga (1990) quanto Bob e Afana (1993) apresentam, em suas equações, fatores e coeficientes que representam a umidade relativa e o teor de CO_2 do ambiente, condições ambientais que também são abordadas pelo modelo de Possan (2010), mas que, neste caso, tendem a influenciar menos dada a relevância da resistência do concreto para esse modelo e a quantidade de outras variáveis tabeladas em função do tipo de cimento Portland escolhido. Mesmo assim, vale ressaltar o bom desempenho do modelo de Possan (2010) na representação da carbonatação natural do concreto sem adições, curados ao ar e com baixas relações a/c (em torno de 0,40).

7 Conclusões

Com base na pesquisa literária realizada, foi possível obter algumas conclusões, que serão apresentadas a seguir:

- Foi verificado que, entre os anos 2000 e 2019, foram realizadas 234 pesquisas no Brasil sobre carbonatação na área de avaliação “Engenharias 1”, sendo 201 dissertações e 33 teses. Ainda se observou que os anos que tiveram mais pesquisas foram 2018, 2019, 2016 e 2004; e que as universidades que mais pesquisaram foram UFG, UFSM, UFRGS, USP e UFMG;
- Entre os modelos disponíveis na literatura para previsão da profundidade da carbonatação em concretos de cimento Portland, foram selecionadas as metodologias de Hamada (1969), Vesikari (1988), Bob e Afana (1993), Morinaga (1990) e Possan (2010), pois eram as que englobavam variáveis relacionadas às características físicas e mecânicas do concreto e às condições de agressividade do ambiente;
- Com o intuito de verificar os modelos selecionados que melhor se adequariam às situações de campo, foram adotados dois estudos de carbonatação natural, o de Carmona (2005) e o de Ferreira (2013), já que ambos se enquadravam nas metodologias prescritas por estes pesquisadores;
- Foram realizadas as correlações entre os modelos de previsão e as medições naturais de carbonatação para os autores supracitados e verificou-se que as variáveis que influenciaram na profundidade de carbonatação foram: relação a/c, tipo de cimento e adição, concentração de CO₂, umidade relativa e temperatura;
- Dessa forma, para os dados de Ferreira (2013), os modelos que apresentaram melhor aderência foram o de Bob e Afana (1993) e o de Morinaga (1990). Já para as informações de Carmona (2005), destaca-se o modelo de Possan (2010), ressaltando-se que a metodologia proposta por esse autor é a mais robusta devido aos parâmetros de entrada;
- Entre os cinco modelos de previsão da vida útil do concreto, os que tiveram melhor aderência aos casos de campo foram o de Bob e Afana (1993), o de Morinaga (1990) e o de Possan (2010). Esses têm em comum, como parâmetros de entrada, a concentração de CO₂ e a umidade relativa;
- Algumas limitações foram encontradas, já que cada modelo tem suas variáveis particulares, o que dificulta sua generalização em campo, mas que podem apresentar grande parcela de relevância de acordo com as situações e dados locais que melhor se apliquem; e
- Por fim, a elaboração desses modelos é de extrema importância para previsão da vida útil e compreensão dos problemas causados pela carbonatação em estruturas de concreto. Fica, assim, como sugestão para pesquisas futuras a aplicação de outros modelos disponíveis, como também a adoção de mais dados de campo para a verificação de uma boa aderência entre os modelos teóricos e os dados de medições naturais.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**. Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Corrosion of metals in concrete**. Manual of concrete practice, part 3. Detroit: American Concrete Institute, 1994.

AENOR – ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. **UNE 112011**: Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. Madrid: Aenor, 2011.

ANDRADE, C. **Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras**. Madrid: CSIC/IETec, 1989.

BOB, C.; AFANA, E. On-site assessment of concrete carbonation. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE FAILURE OF CONCRETE CARBONATION, 1993, Bratislava. **Proceedings** [...]. Bratislava: RILEM, 1993. p. 84-87.

BOLINA, F.; TUTIKIAN, B. Especificação de parâmetros da estrutura de concreto armado segundo os preceitos de desempenho, durabilidade e segurança contra incêndio. **Concreto & Construções: IBRACON**, São Paulo, v. 76, n. 9, p. 133-147, dez. 2014. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_76.pdf. Acesso em: 10 abr. 2020.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/D.3.2005.tde-27072005-163131>.

FARIAS, E. C. **Avaliação da durabilidade frente ao ataque de CO₂ e Cl⁻ em concretos autoadensáveis com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim**. 2019. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/27287/1/Avalia%c3%a7%a3%odurabilidadefrente_Farias_2019.pdf. Acesso em: 15 abr. 2020.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3448>. Acesso em: 28 out. 2022.

HAMADA, M. Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF

CEMENT, 5., 1969. Tokyo. **Proceedings** [...]. Tokyo: Cement Association of Japan, 1969. Part III, v. II/4, p. 343-369.

HILLS, T. P.; GORDON, F.; FLORIN, N. H.; FENNELL, P. S. Statistical analysis of the carbonation rate of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 72, p. 98-107, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.007>.

HUANG, N. M.; CHANG, J. J.; LIANG, M. T. Effect of plastering on the carbonation of a 35-year-old reinforced concrete building. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 206-214, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.049>.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. Disponível em: <http://editora.ifpb.edu.br/index.php/ifpb/catalog/book/81>. Acesso em: 19 jul. 2020.

MORINAGA, S. Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 5., Brighton, 1990. **Proceedings** [...]. London: Spon Press, 1990. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203975015-10/prediction-service-lives-reinforced-concrete-buildings-based-corrosion-rate-reinforcing-steel?context=ubx&refId=5cdad3b6-e0b7-469f-a114-df6e083cbcd>. Acesso em: 20 out. 2020.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 5., Brighton, 1990. **Proceedings** [...]. London: E & F Spon, 1991. p. 27-38. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203975015-12/fundamental-concrete-carbonation-model-application-durability-reinforced-concrete-brown?context=ubx&refId=88765df1-1356-431f-96f4-ee2da1d4839f>. Acesso em: 20 out. 2020.

PEREIRA, A. C. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. 2003. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003. Disponível em: <https://cmec.eeca.ufg.br/n/25051-dissertacoes>. Acesso em: 22 maio 2020.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/28923>. Acesso em: 5 out. 2020.

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. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00166-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00166-2).

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. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90030-D](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90030-D).

SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 12, p. 1647-1653, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.014>.

TA, V.-L.; BONNET, S.; KIESSE, T. S.; VENTURA, A. A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 172-181, dez. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.103>.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 30 p. Disponível em: <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4709458/3173290.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2020.

VESIKARI, E. Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement. **Technical Research Centre of Finland Report**, Otaniemi, Espoo, n. 553, 1988. 53 p. Disponível em: <https://cris.vtt.fi/en/publications/service-life-of-concrete-structures-with-regard-to-corrosion-of-r>. Acesso em: 21 nov. 2020.