

## Previsão da vida útil de estruturas de concreto com base em modelos para avanço da frente de carbonatação

R. Costa<sup>1\*</sup> , A. Franchetto<sup>1</sup> , A. Gouveia<sup>1</sup> , F. Ziegler<sup>1</sup> , K. Pessoa<sup>1</sup> , M. Garcez<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [rayarapintocosta@gmail.com](mailto:rayarapintocosta@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>

Recepção: 14/09/2021 | Aceitação: 02/12/2021 | Publicação: 01/01/2022

### RESUMO

Este artigo busca avaliar a variabilidade na previsão da vida útil de estruturas de concreto através de quatro modelos que estimam o avanço natural da frente de carbonatação. Os resultados mostram que há variabilidade na frente de carbonatação estimada. Os modelos de Possan (2010) e Ekelu (2018) apresentam valores estimados próximos aos medidos, enquanto Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993) tendem, respectivamente, a subestimar e superestimar a frente natural de carbonatação. Somente concretos sem adição de materiais cimentícios suplementares foram considerados, por limitações dos modelos. A resistência à compressão, concentração de CO<sub>2</sub> e umidade relativa do ar têm influência significativa nos resultados e a variabilidade depende de quais parâmetros são considerados nos modelos.

**Palavras-chave:** carbonatação; previsão de vida útil; frente de carbonatação; durabilidade do concreto.

**Citar como:** Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K., Garcez, M. (2022), "Previsão da vida útil de estruturas de concreto com base em modelos para avanço da frente de carbonatação", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 47 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>

<sup>1</sup> Núcleo orientado para a inovação da construção (NORIE), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

#### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, os autores A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa; M. Garcez contribuíram com a concepção da ideia e metodologia do estudo com 16,66% de participação cada. A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa participaram da investigação e análise formal dos resultados com 20% de participação cada. A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa; M. Garcez forneceram contribuições ao manuscrito na discussão dos resultados com participação de 16,66% cada.

#### Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2022, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2022.

## Service life prediction for concrete structures based on carbonation front depth models

### ABSTRACT

This paper seeks to evaluate the variability in predicting the service life of concrete structures through four models that estimate the natural advance of the carbonation front. The results show that there is variability in the estimated carbonation front. The models by Possan (2010) and Ekolu (2018) show estimated values close to measured ones, while Ho and Lewis (1987) and Bob and Affana (1993) tend to underestimate and overestimate the natural carbonation front, respectively. Only concretes without added supplementary cementitious materials were considered, due to model limitations. Compressive strength, CO<sub>2</sub> concentration and relative humidity have significant influence on the results and the variability depends on which parameters are considered in the models.

**Keywords:** carbonatation; service life prediction; carbonatation depth; concrete durability.

## Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón a partir de modelos que estiman el avance del frente de carbonatación

### RESUMEN

Este artículo avalúa la variabilidad en la previsión de la vida útil de estructuras de hormigón a través de cuatro modelos que estiman el avance natural del frente de carbonatación. Los resultados muestran que hay variabilidad en el frente de carbonatación estimado. Los modelos Possan (2010) y Ekolu (2018) presentan valores estimados cercanos a los medidos, mientras que Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) subestiman y sobreestiman el frente de carbonatación natural. Sólo se consideraron los hormigones sin adición de materiales cementantes suplementarios, debido las limitaciones del modelo. La resistencia a compresión, concentración de CO<sub>2</sub> y humedad relativa tienen influencia significativa en los resultados y la variabilidad depende de los parámetros que se consideren en los modelos.

**Palabras clave:** carbonatación; predicción de vida útil; profundidad de carbonatación; durabilidad del hormigón.

### Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de direitos de uso exclusivo: No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUÇÃO

A carbonatação é um fenômeno gerado pela interação do concreto com o ambiente. Ela acontece quando há a reação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) do ar com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), produto de hidratação do cimento, e que propicia a alta alcalinidade na solução intersticial do concreto, formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). O cimento Portland hidratado presente no concreto tem pH alcalino (12-13), devido principalmente ao  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Entretanto, com a formação de  $\text{CaCO}_3$  ocorre a redução desse pH para valores como 9,4, que à temperatura ambiente propicia a precipitação de  $\text{CaCO}_3$ . Então, essa acidificação da matriz cimentícia causa a despassivação da armadura, deixando a mesma susceptível a processos corrosivos. A corrosão é a principal manifestação patológica em estruturas de concreto armado (Peter *et. al.*, 2008; Chen, 2019).

Os principais fatores que afetam a carbonatação e sua velocidade são: temperatura, umidade relativa do ambiente (UR), concentração de  $\text{CO}_2$ , revestimento da superfície, fator a/c, tipo de cimento utilizado, teor de cimento e de água empregado, condições de cura e o grau de hidratação da matriz, permeabilidade do concreto e rede de poros (Ribeiro *et. al.*, 2018; Li *et. al.*, 2018; Song; Kwon, 2007; Houst; Wittmann, 2002). Em idades iniciais (até os 28 dias, geralmente) a carbonatação tem baixa ocorrência. Todavia, com um maior tempo de exposição ao ambiente saturado com  $\text{CO}_2$  a carbonatação fica mais evidente, podendo se manifestar em grande parte da estrutura de concreto (Ribeiro *et. al.*, 2018).

Conforme a NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1 (ABNT, 2013), Vida Útil (VU) é o período em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, atendendo aos níveis de desempenho estabelecidos nesta norma. Para a determinação da VU de estruturas de concreto carbonatadas, procede-se a aplicação de modelos baseados em equações matemáticas para mensurar a profundidade de carbonatação e assim, descobrir a velocidade que essa frente de carbonatação avança para o interior da estrutura (Possan, 2010).

Os modelos que estimam a profundidade de carbonatação pressupõem que o concreto é homogêneo. Na prática isso não ocorre, pois sua consistência depende do tempo de adensamento e cura, além das condições de umidade relativa (UR) do ambiente. Esse pressuposto garante que as propriedades determinantes da taxa de carbonatação são semelhantes em todas as profundidades do concreto, o que simplifica os cálculos (Köliö *et. al.*, 2014).

Não há um modelo que represente fielmente o comportamento da carbonatação no concreto e isso se deve aos diversos fatores explicitados anteriormente. Portanto, a escolha sobre qual modelo aplicar depende das características do objeto de estudo e das variáveis do modelo.

Neste sentido, este trabalho analisa a variabilidade na previsão da VU através de quatro modelos que estimam a profundidade de carbonatação. O estudo é realizado com base em banco de dados de ensaios realizados sob condições naturais de envelhecimento e exposição encontrados na literatura. Uma análise de sensibilidade foi aplicada para identificação dos parâmetros que mais influenciam nas variações encontradas entre os valores estimados pelos modelos e obtidos experimentalmente. Esse estudo busca sobretudo contribuir com a comunidade técnico-científica na temática de manifestações patológicas, especialmente na definição de modelos que consigam melhor estimar o avanço da frente de carbonatação, auxiliando nas tomadas de decisão relativas à durabilidade e à vida útil das estruturas de concreto armado na etapa de projeto.

## 2. MÉTODO

O método utilizado se divide em: *i*) Triagem de modelos matemáticos da literatura para prever a profundidade de carbonatação em concretos; *ii*) Criação de um banco de dados de concreto a partir de trabalhos da literatura; *iii*) Análise comparativa dos modelos *iv*) Análise de sensibilidade para

entender as respostas dos modelos de previsão da profundidade de carbonatação, de acordo com as variáveis que cada modelo considera.

## 2.1 Modelos de estimativa da profundidade de carbonatação

### 2.1.1 Modelo de Possan (2010)

O modelo proposto por Possan (2010), considera fatores que influenciam a carbonatação, além de ter dados de entrada de fácil obtenção conforme em (1). A profundidade de carbonatação é representada pelo fator “y” (mm);  $k_c$  é um fator variável de acordo com o tipo de cimento (Tabela 1);  $f_c$  é a resistência média à compressão (MPa);  $k_{fc}$  é o fator variável à resistência à compressão axial do concreto (Tabela 1);  $t$  é a idade (anos);  $ad$  é o teor de adição pozolânica (% em relação a massa de cimento);  $k_{ad}$  é fator variável referente às adições pozolânicas do concreto (Tabela 1);  $CO_2$  é o teor de  $CO_2$  da atmosfera (%);  $k_{CO_2}$  é fator variável referente ao teor de  $CO_2$  do ambiente (Tabela 1);  $UR$  é a média do ambiente (%\*0,01);  $k_{ur}$  é o fator variável referente à UR (Tabela 1) e;  $k_{ce}$  é o fator variável referente à exposição à chuva (Tabela 2).

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ \left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c}\right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c}\right) + \left(\frac{k_{UR} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c}\right) \right] \cdot k_{ce} \quad (1)$$

Tabela 1. Coeficientes do modelo Possan (2010) por tipo de cimento.

Tipos de cimento	Características do concreto			Características do ambiente	
	Cimento ( $k_c$ )	$f_c$ ( $k_{fc}$ )	Adição ( $k_{ad}$ )	$CO_2$ ( $k_{CO_2}$ )	UR ( $k_{ur}$ )
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

Fonte: Possan, 2010.

Tabela 2. Coeficientes do modelo Possan (2010) em função das condições de exposição.

Tipo de exposição	$k_{ce}$
Ambiente interno protegido da chuva	1,3
Ambiente externo protegido da chuva	1
Ambiente externo desprotegido da chuva	0,65

Fonte: Possan, 2010.

### 2.1.2 Modelo de Ekolu (2018)

O modelo matemático proposto por Ekolu (2018) considera diversos parâmetros relacionados à carbonatação, como UR e temperatura do ambiente, concentração de  $CO_2$ , proteção da estrutura e incidência das chuvas, e estima a profundidade de carbonatação a partir de cinco equações aplicadas em sequência. A profundidade de carbonatação é representada pelo fator “y” (mm);  $e_h$  é o coeficiente relacional referente à UR;  $e_s$  o coeficiente relacional referente à resistência à compressão do concreto;  $e_{co}$  o coeficiente relacional referente à concentração de  $CO_2$  no ambiente;  $F_{c(t)}$  a função de crescimento da resistência do concreto;  $t$  o tempo de exposição do concreto (anos);  $g$  o fator dependente do tipo de cimento e;  $RH$  a UR média do ambiente (%).

$$y = e_h \cdot e_s \cdot e_{co} \cdot 1000 \cdot F_{c(t)}^g \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

$$e_h = 16 \cdot \left(\frac{RH-35}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{1,5} \rightarrow 50\% \leq RH \leq 80\% \quad (3)$$

$$e_s = \begin{cases} 1,0 \rightarrow \text{Exposição externa protegida} \\ f_{c28}^{-0,2} \rightarrow \text{Exposição externa desprotegida} \end{cases} \quad (4)$$

$$e_{co} = \begin{cases} \alpha f_{c28}^r \rightarrow 20 < f_c < 60 \text{MPa} \\ 1,0 \rightarrow f_c > 60 \text{MPa} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{c(t)} = \frac{t}{a+bt} \cdot f_c \rightarrow f_c = f_{c28} \text{ ou } f_{cbn} \quad (6)$$

Para encontrar o "e<sub>co</sub>", utiliza-se (5), inserindo, caso necessário, a resistência à compressão do concreto aos 28 dias de cura (f<sub>c28</sub>) e os respectivos coeficientes de correção "α" e "r" da Tabela 3. F<sub>c(t)</sub> é obtido através da (6), sendo que seus coeficientes "a" e "b" (Tabela 4) dependem dos valores de resistência do concreto considerados (f<sub>c28</sub>, ao se considerar resistência do concreto aos 28 dias e f<sub>cbn</sub>, ao se considerar a resistência do concreto a longo prazo), bem como as idades do concreto considerado. Os coeficientes "g" aplicados na (2) devem ser consultados na Tabela 5.

Tabela 3. Coeficientes de Ekolu (2018) para a equação de e<sub>co</sub>.

Coeficientes	Concentração de CO <sub>2</sub> 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.

Tabela 4. Coeficientes de Ekolu (2018) para a equação de F<sub>c(t)</sub>.

Resistência à compressão	Idade do concreto	a	b
f <sub>c28</sub>	t < 6 anos	0,35	0,6 – t <sup>0,5</sup> /50
	t > 6 anos	0,15t	0,5 – t <sup>0,5</sup> /50
f <sub>cbn</sub>	t < 15 anos	0,35	1,15 – t <sup>0,6</sup> /50
	t > 15 anos	0,15t	0,95 – t <sup>0,6</sup> /50

Fonte: Ekolu, 2018.

Tabela 5. Coeficientes de Ekolu (2018) para a equação de g.

Materiais cimentícios suplementares (MSC)	Tipos de cimento*	Fator de condutância "g"
20% MSC	CEM I, CEM II/A	-1,5
30% cinza volante	CEM II/B, CEM IV/A	-1,4
50% escória	CEM III/A	

\*Conforme norma britânica BS EN 197-1

Fonte: Ekolu, 2018.

### 2.1.3 Modelo de Ho e Lewis (1987)

O modelo de Ho e Lewis (1987) é um aprimoramento do modelo proposto por Tuutti (1982), sendo adicionada na equação um parâmetro para a carbonatação inicial, conforme observado na Equação

8. A profundidade carbonatada é representada pelo fator  $e_c$  (mm);  $e_0$  a profundidade de carbonatação inicial (mm);  $k$  o coeficiente de carbonatação ( $mm/ano$ )<sup>0,5</sup>;  $t$  o tempo (anos).

$$e_c = e_0 + k\sqrt{t} \quad (7)$$

O modelo proposto por Ho e Lewis (1987) não informa como determinar o coeficiente de carbonatação ( $k$ ). Dessa forma, diferentes propostas foram desenvolvidas para a determinação desse coeficiente, como o modelo proposto por Helene (1997), que leva em consideração o tipo de cimento utilizado, a concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente e a resistência à compressão do concreto Equações (8) - (10). O coeficiente de carbonatação é representado pelo fator  $k$  ( $mm/ano$ )<sup>0,5</sup>;  $fck$  a resistência à compressão (MPa) e;  $CCO_2$  a concentração de CO<sub>2</sub> (%).

Concretos em geral (Equação 9):

$$k = (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (8)$$

Concretos com cimento pozolânico (Equação 10):

$$k = 1,1 \cdot (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (9)$$

Concretos com cimento de alto forno (Equação 11):

$$k = 1,2 \cdot (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (10)$$

#### 2.1.4 Modelo de Bob e Affana (1993)

O modelo de Bob e Affana (1993) também se baseia no modelo desenvolvido por Tuutti (1982), porém os autores perceberam que a profundidade de carbonatação do concreto estava relacionada a mais fatores, como a UR do ar, o tipo de cimento e a resistência à compressão do concreto. O modelo é apresentado na Equação (11). A profundidade de carbonatação é representada pelo fator “ $y$ ” (mm);  $c$  é o coeficiente do tipo de cimento (Tabela 6);  $k$  o coeficiente dependente da UR do ar (Tabela 6);  $f_c$  a resistência à compressão do concreto (MPa);  $t$  o tempo (anos) e;  $d$  o coeficiente referente a quantidade de CO<sub>2</sub> (Tabela 6).

$$y = 150 \cdot \left( \frac{c \cdot k \cdot d}{f_c} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (11)$$

Tabela 6. Coeficientes  $k$ ,  $d$  e  $c$  do modelo.

Umidade relativa	$k$
UR ≤ 60	1,0
70 ≤ UR ≤ 75	0,7
80 ≤ UR ≤ 85	0,5
UR ≥ 90	0,3
Quantidade de CO <sub>2</sub>	$d$
CO <sub>2</sub> ≤ 0,03%	1,0
0,03 < CO <sub>2</sub> ≤ 0,1%	2,0
Tipo de cimento	$c$
Cimento Portland CP40 e CP45	0,8

Cimento Portland CP50 e CP55	1,0
Cimento Portland + 15% de adições minerais	1,2
Cimento Portland + 30% de adições minerais	1,4
Cimento Portland + 50% de adições minerais	2,0

Fonte: Bob e Affana, 1993.

## 2.2 Banco de dados

Para a criação do banco de dados realizou-se uma pesquisa bibliográfica na literatura nacional e internacional. A partir destes trabalhos, que avaliaram diferentes traços de concreto sob os efeitos da carbonatação natural, foram selecionados um total de 300 dados. Posteriormente, com esse grupo de dados, foi efetuada uma nova triagem para selecionar os dados que efetivamente poderiam ser utilizados nos modelos matemáticos de carbonatação utilizados neste trabalho, citados no item 3.1. Desses dados de diferentes concretos, utilizaram-se 24 para o desenvolvimento do presente trabalho, apresentados na Tabela 7 onde o termo TE corresponde ao tempo de exposição e ec à profundidade carbonatada.

Tabela 7. Base de dados.

Dados	TE (anos)	a/c	Cimento	fck 28 (MPa)	CO <sub>2</sub> (%)	UR (%)	Exposição	ec (mm)
Possan (2010)	7,00	0,80	CP V	19,80	0,035	0,70	aepc	12,01
	12,00	0,80	CP V	19,80	0,035	0,70	aepc	15,1
Pauletti (2009)	2,50	0,40	CPI	38,96	0,071	0,70	aedc	1,31
	4,83	0,40	CPI	38,96	0,071	0,70	aedc	2,00
Tasca (2012)	2,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipc	0,92
	4,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipc	1,41
	14,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipc	6,35
Nardino et al. (2018)	3,33	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipc	6,00
	6,41	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipc	8,10
	7,80	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipc	7,44
Rozière et al. (2009)	1,00	0,63	CP V*	47,80	0,053	0,50	aedc*	1,20
	1,00	0,63	CP V*	36,20	0,053	0,50	aedc*	10,90
Ribeiro et al. (2018)	10,00	0,65	CP V	32,30	0,015	0,55	aedc	11,90
	10,00	0,44	CP II F	54,20	0,015	0,55	aedc	3,00
Sanjuan et al. (2003)	2,00	0,69	CP V	17,00	0,030	0,50	aipc	7,00
	2,00	0,49	CP V	28,00	0,030	0,50	aipc	5,00
Ferreira (2013)	3,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aedc	7,56
	7,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	12,86
	9,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	13,89
	10,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	13,57
	3,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	10,00
	7,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	15,36
	9,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	16,80
10,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepc	15,96	

UR - umidade relativa; aepc - ambiente externo protegido da chuva; aedc - ambiente externo desprotegido da chuva; aipc - ambiente interno protegido da chuva; TE – tempo de exposição, ec – profundidade carbonatada; \* - dado estimado..

### 2.3 Comparação dos modelos e análise de sensibilidade

Foi realizada uma comparação da profundidade de carbonatação real (mm), em relação à profundidade de carbonatação estimada, e quantificou-se o erro (mm e %). Além disso, foi determinado o nível de sensibilidade dos modelos, levando em consideração três fatores: resistência à compressão (MPa); concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente (%); UR do ambiente (%). A partir desses critérios, foi feita uma simulação de cenários de carbonatação natural, onde os fatores variaram em teor, enquanto outras variáveis permaneceram fixas. Os fatores estipulados para os cenários foram definidos com base nas informações obtidas pelo banco de dados. As profundidades de carbonatação foram delimitadas por um período de 50 anos. Tendo esses fatores em vista, foram determinados três cenários, que estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8. Descrição dos cenários A, B e C.

<b>Cenário A – varia resistência à compressão aos 28 dias</b>				
Resistência à compressão (MPa)	40		20	
Umidade relativa (%)	65		65	
Dióxido de carbono (%)	0,035		0,035	
Tipo de ambiente	Interno		Interno	
Tipo de cimento	CP V		CP V	
<b>Cenário B – varia dióxido de carbono do meio ambiente</b>				
Resistência à compressão (MPa)	40		40	
Umidade relativa (%)	65		65	
Dióxido de carbono (%)	0,03		0,07	
Tipo de ambiente	Interno		Interno	
Tipo de cimento	CP V		CP V	
<b>Cenário C – varia umidade relativa do meio ambiente</b>				
Resistência à compressão (MPa)	40	40	40	40
Umidade relativa (%)	30	50	70	90
Dióxido de carbono (%)	0,035	0,035	0,035	0,035
Tipo de ambiente	Interno	Interno	interno	Interno
Tipo de cimento	CP V	CP V	CP V	CP V

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 1 (a) mostra que há uma tendência dos modelos gerarem resultados diferentes dos observados nos experimentos. Essas observações são mais explícitas para o modelo de Bob e Affana (1993) que superestimou, e o modelo de Ho e Lewis (1987) que subestimou as profundidades de carbonatação.

Os dados apresentados na Figura 1 (b) permitem comparar as profundidades estimadas por cada modelo, em relação às profundidades reais medidas.

A reta vermelha tracejada representa resultados iguais para os valores estimados e obtidos experimentalmente: os pontos acima da linha representam valores que foram superestimados pelo modelo, enquanto valores sob a linha representam estimativas subestimadas para a profundidade de carbonatação.

É possível perceber que o modelo de Ho e Lewis (1987) resulta em valores que subestimam de maneira mais evidente as profundidades, e que o modelo de Bob e Affana (1993) as superestimam. Os modelos de Possan (2010) e Ekolu (2018), por outro lado, aproximam-se da linha tracejada, uma vez que os valores estimados são mais condizentes com os obtidos nos experimentos, e

subestimam a profundidade de carbonatação.

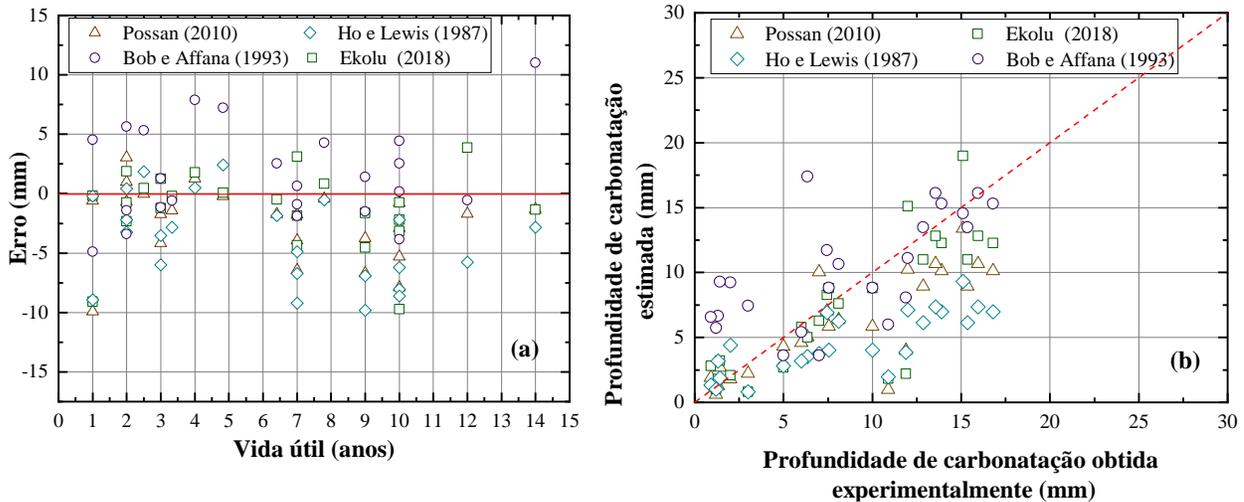


Figura 1. Erros para as profundidades de carbonatação em função do tempo (a) e comparativo entre a profundidade de carbonatação estimada e obtida experimentalmente (b).

A Figura 2 (a) contém os resultados da análise de sensibilidade dos modelos quanto à resistência à compressão, considerando valores de 20 e 40 MPa no processo de carbonatação natural durante o período de 50 anos. Nessa figura são apresentadas as profundidades de carbonatação e o tempo de VU (vida útil), sendo indicado o cobrimento mínimo de 25 mm estipulado pela NBR 6118 (2014) para estruturas em ambiente urbano (classe de agressividade II, moderada).

Em todos os modelos do cenário A, o crescimento da resistência à compressão do concreto resulta em menores profundidades de carbonatação. Esse comportamento está condizente ao previsto em literatura, visto que menores relações a/c estão diretamente ligadas à redução da porosidade da matriz, o que reduz a profundidade de carbonatação e é fator determinante da resistência do concreto (Tuutti, 1982; Ho e Lewis, 1987; Kulakowski, 2002).

A redução na profundidade de carbonatação ocasionada pelo aumento da resistência à compressão dos concretos de 20 para 40 MPa, considerando resultados para o mesmo período de tempo, é de aproximadamente 68,55%, 70,3%, 49,97% e 50% para os modelos de Possan (2010), Ekolu (2018), Ho e Lewis (1987), Bob e Affana (1993), respectivamente, esses valores são obtidos ao se fixar as variáveis das fórmulas de cada método variando-se apenas a resistência à compressão. Isso mostra que o fator resistência à compressão exerce maior influência nas profundidades de carbonatação estimadas pelos modelos de Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993). Além disso, os modelos Possan (2010) e Bob e Affana (1993) preveem que o concreto de 20 MPa não conseguiria atender uma VU de 50 anos com um cobrimento de 25 mm nas condições estipuladas para o Cenário A. Já para os outros modelos, o concreto de 20 MPa já atenderia a esse requisito.

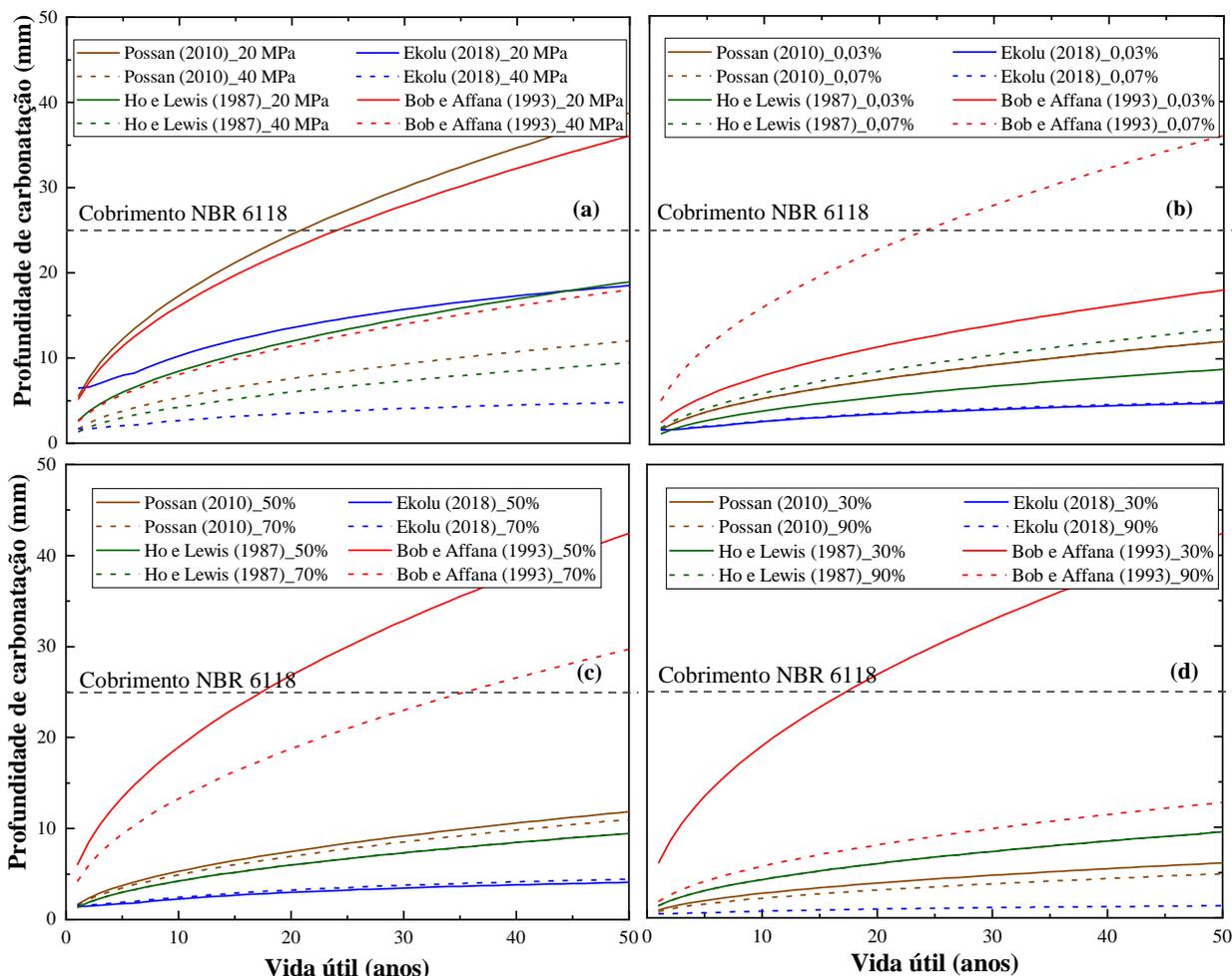


Figura 2. Tempo de vida útil e profundidade de carbonatação em relação a resistência à compressão – Cenário A – (a), dióxido de carbono no meio ambiente - Cenário B – (b), umidade relativa de 50 e 70% - Cenário C – (c) e umidade relativa de 30 e 90% - Cenário C - (d).

A Figura 2 (b) mostra a sensibilidade dos modelos quanto ao teor de  $\text{CO}_2$  presente no ambiente. Os teores de  $\text{CO}_2$  foram delimitados com base nos valores obtidos no banco de dados e definições apresentadas no trabalho de Possan (2010). Estipulou-se, então, concentrações de 0,03% e 0,07% no processo de carbonatação natural durante o período de 50 anos. Pires (2016) apresenta a concentração de  $\text{CO}_2$  como um dos fatores intervenientes no processo de carbonatação do concreto, e Cadore (2008) sugere que a velocidade de penetração da frente de carbonatação tem relação direta com a concentração de  $\text{CO}_2$  no ambiente, ou seja, eleva-se a velocidade de carbonatação com o aumento da concentração de  $\text{CO}_2$ .

Nota-se na Figura 2 (b) que embora a carbonatação cresça com a elevação dos teores de  $\text{CO}_2$ , nos modelos de Possan (2010) e Ho e Lewis (1987), esse crescimento é menor. O aumento da profundidade de carbonatação ocasionada pelo crescimento do teor de  $\text{CO}_2$  do ambiente considerando as médias das mesmas é de aproximadamente 0,17%, 2,89%, 53,84% e 100% para os modelos de Possan (2010), Ekolu (2018), Ho e Lewis (1987), Bob e Affana (1993), respectivamente. Esse resultado indica que o fator  $\text{CO}_2$  do modelo Possan (2010) e Ekolu (2018) exercem menor influência nas profundidades de carbonatação estimadas para o Cenário B, comparativamente aos outros modelos mencionados. O modelo de Bob e Affana (1993) sugere que em ambientes com 0,07% de  $\text{CO}_2$ , o concreto não conseguiria atender uma VU de 50 anos com um cobrimento de 25 mm nas condições estipuladas para o Cenário B.

A Figura 2 (c) ilustra a sensibilidade ao teor de UR do ambiente no processo de carbonatação natural para um período de 50 anos. As UR selecionadas são valores extremos encontrados na literatura para os processos de carbonatação natural (Pauletti, 2009; Tasca, 2012; Rozière, 2009; Nardino, 2019).

No cenário C, verifica-se que o crescimento da UR do ambiente resulta na redução da profundidade de carbonatação para o modelo de Possan (2010) e Bob e Affana (1993). Entretanto, enquanto o modelo de Possan (2010) tem uma diminuição de 7,16% em termos de média, Bob e Affana (1993) tem uma redução de 30%. Isso sugere que o método de Bob e Affana (1993) tem uma sensibilidade maior a esta variável. No modelo de Ekolu (2018) há o crescimento da profundidade de carbonatação em 8,44% considerando as médias. No modelo de Ho e Lewis (1987), por outro lado, os valores de carbonatação permanecem inalterados com o incremento de 20% na UR. Isto é explicado devido ao modelo de Ho e Lewis (1987) não possuir entrada de dados para UR, sendo a equação portanto, insensível a este fator.

A UR do ambiente é fator relevante para o processo de carbonatação e deve ser contabilizada direta ou indiretamente nos modelos de previsão de VU por carbonatação natural. Nesse fenômeno, a água presente nos poros é responsável por dissolver o  $\text{CO}_2$ , formando o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , produto da hidratação do cimento. O resultado é a formação de  $\text{CaCO}_3$  (Pauletti, 2009). O volume e composição da água dos poros são influenciados por fatores como a relação a/c, tempo de cura, temperatura e, inclusive, a UR do ambiente, fator aqui avaliado (Vieira et al., 2016).

A literatura indica ainda que ambientes com excesso ou baixa UR não são propícios para o processo de carbonatação natural. Na primeira situação, os poros do concreto ficariam preenchidos com água, dificultando a penetração do  $\text{CO}_2$  para formar  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Por outro lado, em condições de baixa UR, a água nos poros do concreto seria insuficiente para gerar taxas de carbonatação natural mais aceleradas, uma vez que é necessário água para gerar  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (Félix et al., 2017; Possan et al., 2017; Elsalamawy et al., 2019; Dierfeld et al., 2020).

Considerando o Cenário C, os resultados de Possan (2010) e Bob e Affana (1993) mostraram uma redução nas profundidades de carbonatação devido ao crescimento da UR de 50 para 70%, o que sugere que nesses modelos a saturação dos poros é prevista nessas faixas de UR do ambiente. Em contraste, os resultados obtidos por Ekolu (2018), sugerem que esses teores de UR são propícios ao processo de carbonatação. Nesse sentido, Chen et al., (2018) observaram um aumento da profundidade de carbonatação com um aumento da UR do ambiente, com um pico de cerca de 70%. Os dados adquiridos pelo método Ekolu (2018) no Cenário C seguem o sugerido por esses autores.

Para a melhor compreensão desses comportamentos, os modelos Possan (2010), Ekolu (2018) e Bob e Affana (1993) foram também testados no Cenário C, considerando 30% e 90% de UR. Os resultados constam na Figura 2 (d). Para o método de Possan (2010), são obtidas profundidades de carbonatação inferiores em faixas de UR de 30% e 90% comparativamente a teores de 50% e 70%. Enquanto as médias de profundidades de carbonatação em 50 anos para 50% e 70% de UR são 8,01 mm e 7,43 mm, respectivamente, para 30% e 90% de UR são 4,10 mm e 3,28 mm respectivamente. Isso indica que o modelo é sensível a condições de excesso e baixa UR.

Ainda, no modelo de Ekolu (2018), o teor de 30% gera valores negativos, enquanto que 90% prevê resultados significativamente inferiores ao de 50% e 70%. Sugere-se assim que esse modelo reconheça a faixa de UR de 50 e 70% como mais propícia para o processo de carbonatação. Já para o modelo Bob e Affana (1993), a UR de 30% resulta em profundidade de carbonatação igual à condição de 50%. Isso ocorre porque o modelo de Bob e Affana (1993) não tem como dado de entrada a UR, mas sim coeficientes determinados com base em faixas de UR. Assim sendo, o mesmo coeficiente (1,0) é utilizado para UR iguais ou inferiores a 60%, logo, o modelo não é sensível a UR inferiores a este valor. O mesmo acontece com valores iguais ou superiores a 90%, onde adota-se o coeficiente 0,3. Entretanto, o modelo considera que para  $\text{UR} \leq 60\%$  a profundidade

de carbonatação é superior à condição com  $UR \geq 90\%$ . Para 30% obteve-se uma média de profundidade de carbonatação ao longo de 50 anos de 28,68 mm, enquanto para 90% encontrou-se 8,6 mm. A Figura 2 (c) indica ainda que segundo o modelo de Bob e Affana (1993), concretos em ambientes com 50 e 70% de UR não conseguiriam atender uma VU de 50 anos com um cobrimento de 25 mm nas condições estipuladas para o Cenário C. Além disso, de acordo com o modelo de Bob e Affana (1993), o concreto no ambiente com 30% UR, e condições como no Cenário C, Figura 2 (d), não atenderiam a uma VU de 50 anos para um cobrimento de 25mm.

#### 4. CONCLUSÕES

As principais considerações que podem ser tomadas com base nos resultados discutidos neste artigo são:

- Os modelos matemáticos de Possan (2010) e Ekolu (2018) resultam em profundidades de carbonatação mais próximas às encontradas nos ensaios;
- O modelo de Ho e Lewis (1987) tende a subestimar a profundidade de carbonatação;
- O modelo de Bob e Affana (1993) tende a superestimar a profundidade de carbonatação;
- Os modelos Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993) mostraram maior influência do fator resistência à compressão nas profundidades de carbonatação;
- O fator concentração de  $CO_2$  dos modelos Possan (2010) e Ekolu (2018) exercem a menor influência nas profundidades de carbonatação estimadas para o Cenário B comparativamente aos outros modelos mencionados;
- O modelo de Bob e Affana (1993) tem a maior sensibilidade à variável UR. Enquanto o modelo Ho e Lewis (1987) não possui entrada de dados para essa variável.

O modelo de Possan (2010) e Bob e Affana (1993) com concreto de 20 MPa no Cenário A, modelo Bob e Affana (1993) com concreto exposto a 0,07%  $CO_2$  no ambiente no Cenário B, e modelo Bob e Affana (1993) com concreto exposto em ambiente de UR de 50% e 70% no Cenário C, não conseguiriam atender uma VU de 50 anos com um cobrimento de 25 mm nas condições estipuladas. Também não atende a VU de 50 anos para um cobrimento de 25 mm, segundo o modelo Bob e Affana (1993), com concretos em ambientes com 30% UR, para o Cenário C.

Assim, nota-se que há variabilidade nos resultados de frente de carbonatação estimados pelos modelos selecionados comparativamente aos resultados reais de carbonatação natural. E essa variabilidade, se dá em maior ou menor grau dependendo dos parâmetros considerados nas equações. A análise de sensibilidade realizada com os três parâmetros avaliados, resistência à compressão, concentração de  $CO_2$  e umidade relativa do ar, mostra que essas variáveis têm influência significativa nos resultados emitidos pelos modelos e, portanto, devem ser considerados nas equações.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI), por fornecer os subsídios necessários para o desenvolvimento deste estudo.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto*

– *Procedimento. Rio de Janeiro.*

Bob, C., Afana, E. (1993). “*On-site assessment of concrete carbonation*”. Proceedings of the International Conference Failure of Concrete Structures, RILEM, Bratislava: (Rep. Eslovaca), pp. 84–87.

Cadore, W.C. (2008), “*Estudo da camada de cobertura de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, p.149.

Chen, T., Gao, X. (2019), *Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste*. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 34:74-86. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.034>

Chen, Y., Liu, L., Yu, Z. (2018), *Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength*. Materials, 11, 2167. <https://doi.org/10.3390/ma11112167>

Dierfeld, S. G. et al. (2020), *Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC*. Materials and Structures, 53:136. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>

Elsalamawy, M., Mohamed, A. R., Kamal, E. M. (2019), *The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete*. Alexandria Engineering Journal 58(4):1257–1264. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.008>

Ekolu, S. O. (2018), *Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation*. Cement and Concrete Composites. 86:40-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.006>

Ferreira, M. B. (2013), “*Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, p. 197.

Félix, E. E., Carrazedo, R., Possan, E. (2017), *Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais*. Revista ALCONPAT, 7(3), pp. 302-316. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.245>

Helene, P. (1997). “*Vida útil das Estruturas de Concreto*”. in: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais. Porto Alegre: RS (Brasil).

Ho, D. W. S., Lewis, R. K. (1987), *Carbonation of concrete and its prediction*. Cement and Concrete Research, 17(3):489-504. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3)

Housty, Y. F., Wittmann, F. H. (2012), *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*. Cement and Concrete Research, 32(12):1923-1930. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00908-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00908-0)

Köliö, A. et al. (2014), *Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing climate*. Engineering structures, 62-63:42-52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.032>

Kulakowski, M. P. (2002), “*Contribuição ao estudo de carbonatação de concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: RS (Brasil), p. 180.

Li, D. et al. (2018), *Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures*. Construction and Building Materials, 167:73-81 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.127>

Nardino, C. et al. (2019) “*Previsão de vida útil de estruturas por modelos matemáticos e carbonatação natural*” in: 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, Curitiba:PR (Brasil), pp. 300-311. <https://doi.org/10.4322/2526-7248.052>

Pauletti, C. (2009). “*Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre:RS (Brasil), p. 285.

- Peter, M. A. et al. (2008), *Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study*. Cement and concrete research, 38(12):1385-1393. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.09.003>
- Pires, P. F. (2016). “*Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás. p. 141.
- Possan, E. (2010), “*Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 263.
- Possan, E. et al. (2017), *CO2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study*. Case Studies in Construction Materials, 6:147-161. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>
- Ribeiro, D. V. et. al. (2018), “*Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção*”. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, p. 426.
- Ribeiro, A. B., Santos, T., Gonçalves, A. (2018), *Performance of concrete exposed to natural carbonation: Use of the k-value concept*. Construction and Building Materials. 175:360–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.206>
- Rozière, E., Loukili, A., Cussigh, F. (2009), *A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation*. Construction and Building Materials 23(1):190–199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.006>
- Sanjuán, M., Andrade, C., Cheyreyzy, M. (2003), *Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions*. Advances in Cement Research, 15(4):171–180. <https://doi.org/10.1680/adcr.2003.15.4.171>
- Song, H., Kwon, S. (2007), *Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure*. Cement and Concrete Research, 37(6):909-915. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.011>
- Tasca, M. (2012), “*Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, p. 178.
- Tuutti, K. (1982), “*Corrosion of Steel in Concrete*”. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, p.468.
- Vieira, R. E. et al. (2016). “*Aspectos sobre a extração e composição da água de poro de pasta de cimento hidratado com vista à durabilidade do concreto armado*”. in: 7 Congresso Brasileiro de Cimento - CBCI, São Paulo: SP (Brasil), pp. 15.