

## CARBONATAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS DE TUUTTI E CEB MODEL CODE

Pâmela Palazzi Passos<sup>1</sup>, Káryta Xavier de Albuquerque<sup>2</sup>, Tiago Ferreira Campos Neto<sup>3</sup>

### Resumo

A durabilidade de uma estrutura de concreto está diretamente ligada às suas características. A alcalinidade desse material é a principal responsável pela proteção contra oxidação das armaduras da peça e o processo de carbonatação afeta essa propriedade, reduzindo sua vida útil. Logo, o objetivo deste artigo é avaliar a aplicabilidade do modelo CEB Bulletin 55 (2010) para cálculo de profundidade de carbonatação estimada tendo como parâmetros os dados reais obtidos pelo modelo de Tuutti (1982). Como objeto de estudo foram utilizadas cinco obras com diferentes idades, sendo uma em classe de agressividade maior do que as outras. O modelo de Tuutti foi aplicado utilizando-se resultados obtidos de ensaios em campo, enquanto o modelo CEB Bulletin 55 foi calculado utilizando dados climáticos reais. Pode-se concluir que quanto maior o período de exposição da estrutura, maior será sua frente de carbonatação estimada, entretanto em casos reais a qualidade do concreto pode afetar consideravelmente a deterioração da estrutura. As profundidades medidas *in loco* foram maiores quando comparadas aos estimados, o que acontece devido a fatores que não são considerados na estimativa do CEB Bulletin 55, como por exemplo, a obstrução dos poros pelo produto da carbonatação. Por fim, considerando-se os erros padrão, o modelo de estimativa é passível de ser utilizado, entretanto para confirmação final, maiores amostras deverão ser ensaiadas. É imprescindível que os engenheiros se atentem ao controle tecnológico dos concretos, visto que sua qualidade é fator fundamental para maior vida útil das estruturas.

**Palavras-chave:** Deterioração das estruturas. Durabilidade do concreto. Carbonatação. CEB Bulletin 55. Tuutti.

### Abstract

The durability of concrete structures is directly linked to its characteristics. The alkalinity of the material is primarily responsible for the protection of the reinforcement against oxidation and the carbonation process affects this property, reducing its service life. Therefore, this paper aims to evaluate the applicability of the CEB Bulletin 55 model (2010) to estimate the carbonation depth, taking as parameters the real data obtained by Tuutti model (1982). As study objects five buildings with different ages were used, being on in a class of aggressiveness greater than the others. The Tuutti model was applied using field test results, while the CEB Bulletin 55 model was calculated using real climatic data. It can be concluded that the longer the exposure period of the structure, the greater its estimated carbonation depth, however in real cases the quality of the concrete can considerably affect the deterioration of the structure. The depths measured *in loco* were higher when compared to the estimated ones, which happens due to factors that are not considered in the estimation of CEB

---

<sup>1</sup> pamelapalazzip@gmail.com, Graduada em Engenharia Civil na Universidade de Rio Verde, Fazenda Fontes do Saber, Caixa Postal 104. CEP: 75.901-970 – Rio Verde - GO.

<sup>2</sup> karytarv100@hotmail.com, Graduada em Engenharia Civil na Universidade de Rio Verde, Fazenda Fontes do Saber, Caixa Postal 104. CEP: 75.901-970 – Rio Verde - GO.

<sup>3</sup> tiagocampos@unirv.edu.br, Professor Mestre, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde, Fazenda Fontes do Saber, Caixa Postal 104. CEP: 75.901-970 – Rio Verde - GO.

Bulletin 55, as for example, the obstruction of the pores by the carbonation products. Finally, considering the standard errors, the estimation model can be used, however for final confirmation, more samples should be tested. It is imperative that engineers attend to the technological control of the concrete, since its quality is a fundamental factor for the longer service life of the structures.

**Key words:** Structure's degradation. Durability of concrete. Carbonation. CEB Bulletin 55. Tuutti.

## Introdução

As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil (ABNT NBR 6118, 2014). Conforme Helene (2004), a resistência da estrutura de concreto à ação do meio ambiente e ao uso, dependerá da resistência do concreto, da armadura e da própria estrutura.

A deterioração se manifesta através de fatores externos ou internos, resultantes de ações físicas, mecânicas ou químicas. Os danos mecânicos são causados por impacto, abrasão, erosão ou cavitação. As causas físicas incluem os efeitos da alta temperatura ou das diferenças entre os coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento endurecida. Além disso, é importante ressaltar que o ataque químico externo é causado por cloretos, sulfatos ou pelo dióxido de carbono (NEVILLE, 2016).

Segundo Cascudo<sup>4</sup> (1997 apud SPÍNDOLA et al., 2017), a proteção das armaduras ocorre quando o interior do concreto possui uma alta alcalinidade, pois assim a superfície metálica do aço se recobre em uma película de óxidos passivantes e protetores.

A carbonatação consiste na penetração do CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) pelo concreto e a sua interação com a umidade presente (H<sub>2</sub>O), formando o ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), diminuindo o pH para valores abaixo de 9. O hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) é um dos elementos resultantes da hidratação do cimento, um dos principais responsáveis pela alcalinidade do concreto. Quando o Ca (OH)<sub>2</sub> entra em contato com o CO<sub>2</sub>, obtém-se o CaCO<sub>3</sub> (carbonato de cálcio) (RIBEIRO; CUNHA, 2014). Dessa forma, o avanço da frente de carbonatação está intimamente ligado à capacidade que o CO<sub>2</sub> tem de se difundir através do cobrimento do concreto (x) e no tempo (t), como mostra a Figura 1 (POSSAN, 2010).

---

<sup>4</sup> CASCUDO, O. O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo, PINI; Goiânia, Editora UFG, 1997.

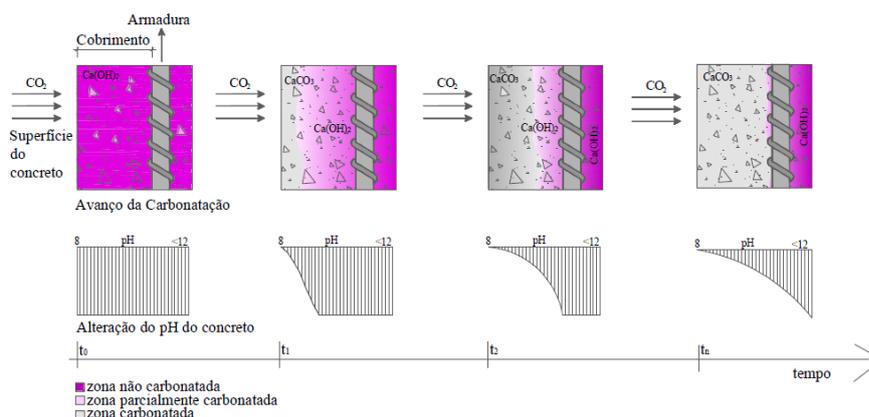
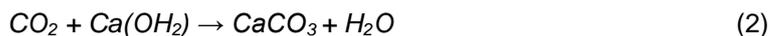


Figura 1 – Representação da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo  
 Fonte: Possan (2010).

Ainda, de acordo com Ribeiro e Cunha (2014), pode-se descrever a formação do ácido carbônico e a reação principal da carbonatação por meio das Equações 1 e 2.



Segundo Carmona (2005), as armaduras estão protegidas devido ao fato do concreto possuir um pH alcalino de aproximadamente 13. Esta condição denominada passivação, pode sofrer alterações com a presença de agentes agressivos como íons cloreto, ou o CO<sub>2</sub> atmosférico. A penetração de CO<sub>2</sub> acontece de fora para dentro, pois a concentração dessa molécula é maior externamente, estando diretamente ligada ao concreto de cobrimento, possuindo grande importância para proteção e conservação das estruturas (FERREIRA 2013). O CO<sub>2</sub> que penetra na superfície do concreto pode reagir com os componentes alcalinos da pasta de cimento, principalmente Ca(OH)<sub>2</sub> reduzindo o valor do pH nas substâncias presentes nos poros para valores inferiores a 9 (RILEM, 1988).

As condições climáticas definem a umidade superficial do concreto, e, por consequência, a difusão do dióxido de carbono no interior do mesmo (CARMONA, 2005). A velocidade de carbonatação aumenta de acordo com a concentração de CO<sub>2</sub> (ANDRADE, 2001). Se o teor de água for muito baixo (menor que 20%), não haverá dissolução. O processo fica mais lento se os poros estiverem preenchidos com água (saturados), ocorrendo uma carbonatação máxima com umidade relativa intermediária (PARROT, 1986; PAULETTI, 2004), conforme apresentado na Figura 2.

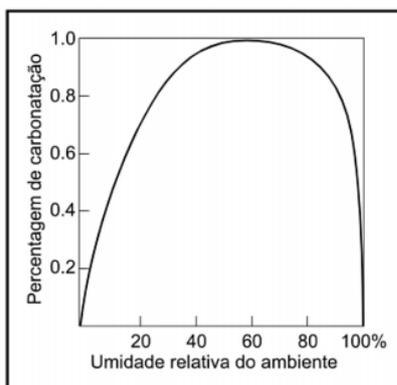


Figura 2 – Porcentagem de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente  
Fonte: Lima (2011).

As características do concreto estão diretamente ligadas à porosidade, sendo essencial para proteção contra agentes agressivos facilitando o transporte do  $\text{CO}_2$  em seu interior (OLLIVIER; TORRENTI, 2014). Além disso, o local em que a frente de carbonatação estiver concluída, possuíra uma grande quantidade de produtos reagidos, por exemplo  $\text{CaCO}_3$ , que é extremamente difícil de se dissolver, tornando o concreto impermeável, dando origem a um estágio de paralização das reações, uma vez que o sistema de poros seria completamente preenchido com compostos sólidos (TUUTTI, 1982).

Em ambientes urbanos e industriais observa-se uma maior concentração de  $\text{CO}_2$  proveniente da queima de combustíveis fósseis e processos industriais, afetando diretamente as taxas de carbonatação, estando ligada à classe de agressividade ambiental (CAMPOS NETO et al. 2018). Outro fator que também afeta o processo de carbonatação é a elevação da temperatura que acelera as reações químicas de degradação (LIMA, 2011).

Segundo CEB Bulletin 34 (2006), o método estimado não pode ser aplicado em uma estrutura em processo de hidratação, pois não fornecerá uma estimativa confiável do progresso de carbonatação, tendo que a umidade relativa da atmosfera circundante, bem como as propriedades do concreto têm uma forte influência sobre a  $\text{DCO}_2$ .

### *Objetivo geral*

Avaliar a relação existente entre frentes de carbonatação avaliadas *in loco* pelo modelo de Tuutti (1982) e estimadas pelos modelos do CEB Bulletin 55 (2010).

### *Objetivos específicos*

- Determinar o coeficiente de carbonatação de obras localizadas em diferentes classes de agressividade;
- Avaliar o impacto de classe de agressividade no coeficiente de carbonatação do concreto;

- Analisar a viabilidade técnica de aplicação do modelo do CEB Bulletin 55 (2010).

## Material e métodos

### Objetos de estudo

A pesquisa foi fundamentada na análise de cinco obras com diferentes parâmetros, sendo eles o tempo de exposição da obra, classe de agressividade ambiental e uso. Grande parte das obras em estudo possuem classe de agressividade ambiental II, pois são localizadas em zona urbana e possuem diferentes períodos de exposição, sendo eles 2, 20, 30 e 45 anos. O estudo também abrange a obra de classe de agressividade ambiental IV, com cinco anos de exposição, conforme apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Ficha descritiva das obras

Ficha descritiva das obras					
	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5
Tipologia/ Localização	Casa Residencial - Rua Ernestina - Solar dos Ataídes	Fábrica de Fertilizantes COMIGO – BR 060	Casa Residencial - Pauzanes de Carvalho	Apartamento Residencial - Ed. Granville - Rua Costa Gomes - Centro	Casa Residencial - Rui Barbosa - Centro
Ano de construção	2016	2013	1998	1988	1973
Ano do estudo	2018	2018	2018	2018	2018
Idade até o momento do estudo	2 anos	5 anos	20 anos	30 anos	45 anos
Classe de agressividade ambiental (NBR 6118: 2014)	II - Moderada - ambiente urbano c/ pequeno risco de deterioração	IV - Forte - ambiente industrial c/ grande risco de deterioração da estrutura	II - Moderada - ambiente urbano c/ pequeno risco de deterioração	II - Moderada - ambiente urbano c/ pequeno risco de deterioração	II - Moderada - ambiente urbano c/ pequeno risco de deterioração

Fonte: Próprio Autor (2018).

### Metodologia

- Avaliação da profundidade de carbonatação em campo

Não existe normativa brasileira que regulamente o ensaio de carbonatação, portanto, tomou-se como parâmetro a metodologia adotada por Campos Neto et al. (2018). O planejamento do estudo e os procedimentos a serem realizados seguiram a ordem de atividades descritas abaixo:

1. Com o auxílio de um martelo rompedor foi escarificada uma camada de profundidade equivalente ao cobrimento da armadura. A região escarificada foi localizada de modo que o concreto acima da linha neutra não fosse afetado;

2. Na região exposta foi borrifada solução de fenolftaleína, conforme figura 3, indicando a profundidade de carbonatação do concreto referente a cada obra em estudo. A solução foi preparada, de acordo com Helene (1993), na relação 1:49:50 (fenolftaleína, álcool e água, respectivamente). A profundidade foi medida com o auxílio de uma régua 30 segundos após o contato com a solução. As regiões não carbonatadas sofreram alterações de coloração, definindo a profundidade de deterioração do concreto;

3. Realizou-se o preenchimento da região escarificada com argamassa devidamente dosada, a fim de proteger a armadura do elemento estrutural.



Figura 3 – Região borrifada com fenolftaleína  
Fonte: Próprio Autor (2018).

- Determinação do coeficiente de carbonatação segundo o modelo de Tuutti (1982)

Geralmente, é o modelo mais utilizado nos trabalhos por ser o mais simples e rápido de ser aplicado e também fornecer resultados condizentes com os reais se aplicado corretamente (POSSAN, 2010).

Após determinada a profundidade em campo, calcula-se o coeficiente de carbonatação em  $\text{mm/ano}^{0,5}$ , conforme Equação 3.

$$e(t) = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Onde:

$e(t)$  = profundidade de carbonatação [mm];  
 $k_{CO_2}$  = coeficiente de carbonatação [ $\text{mm/ano}^{0,5}$ ];  
 $t$  = tempo de exposição [anos].

- Estimativa da frente de carbonatação pelo modelo do CEB Bulletin 55 (2010)

O modelo utilizado na pesquisa CEB Bulletin 55 (2010), leva em consideração parâmetros ambientais ( $k_e$ ), climáticos ( $W$ ), de execução ( $K_c$ ), resistência à carbonatação ( $R_c$ ), concentração atmosférica de  $CO_2$  ( $C_s$ ) e o tempo de exposição ( $t$ ). A propagação da frente de carbonatação da superfície do concreto é descrita pela Equação 4.

$$e(t) = \sqrt{2 \cdot K_e \cdot K_c \cdot R_c \cdot C_s} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t) \quad (4)$$

Onde:

$e(t)$  = Profundidade de carbonatação no tempo ( $t$ ) – [m];  
 $t$  = tempo – [s];  
 $K_e$  = Coeficiente ambiental [adimensional];  
 $K_c$  = Coeficiente de condição de cura [adimensional];  
 $C_s$  = Concentração de  $CO_2$  no ar – [kg/m<sup>3</sup>];  
 $W(t)$  = Coeficiente climático [adimensional];  
 $R_c$  = Resistência à carbonatação natural do concreto (mm<sup>2</sup>/anos)/(kg/m<sup>3</sup>).

- Coeficiente ambiental ( $K_e$ )

Conforme o CEB Bulletin 34 (2006), o coeficiente ambiental ( $K_e$ ) considera a influência do teor de umidade relativa do ar no coeficiente de difusão  $e$ , conseqüentemente, na resistência à carbonatação do concreto. O  $K_e$  pode ser calculado conforme Equação 5.

$$K_e = \left( \frac{1 - (RH_{real})^{f_e}}{100} \right)^{g_e} \quad (5)$$

Onde:

$RH_{real}$  = umidade relativa da camada carbonatada [%];  
 $RH_{ref}$  = umidade relativa de referência [%];  
 Expoentes  $f_e$  (5,0) e  $g_e$  (2,5) [adimensionais].

A umidade relativa real foi calculada através dos dados fornecidos pela estação meteorológica da Universidade de Rio Verde (UniRV), respeitando a idade de cada obra; e para a umidade relativa de referência foi adotado 65%, tendo como parâmetro valores determinados em testes de carbonatação acelerada (ACC) realizados para determinação da resistência à carbonatação do concreto (CEB Bulletin 34, 2006). Os expoentes  $g_e=2,5$  e  $f_e=5,0$ , também foram retirados do método ACC, através de um ajuste de curvas com dados reais do ensaio, ressaltando que os melhores resultados foram obtidos com esse conjunto de parâmetros, sendo eles independentes das condições de exposição e das fases de gerenciamento.

- Coeficiente de condição de cura ( $K_c$ )

O parâmetro  $K_c$  leva em consideração a influência que a cura do concreto tem na resistência a carbonatação, conforme Equação 6.

$$K_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{bc} \quad (6)$$

Onde:

$bc$  = expoente da regressão [adimensional];

$t_c$  = período de cura [d].

A pesquisa de campo foi realizada em vigas interiores e para o tempo de cura ( $t_c$ ) realizado no período de execução, portanto adotou-se vinte e oito dias como padrão para todas as obras, o que resulta em  $K_c$  inferior a 1,0. O expoente de regressão, conforme o CEB Bulletin 34 (2006) estabelece valor médio igual a -0,567 com desvio padrão aceitável dentro o período de  $\pm 0,024$ , adotando-se valor médio descrito em norma.

Conforme tabela abaixo, a relação  $K_e \times K_c$  estimados demonstram que o tempo de cura resultou em dados favoráveis à execução e qualidade das estruturas, pois aproximam-se de 1,0. Os valores de referência e obtidos na pesquisa estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores dos coeficientes de Cura e Exposição

Valores de referência (CARMONA, 2005)			Valores obtidos na pesquisa				
Tipo de exposição	Cura	$K_e \times K_c$	$K_e \times K_c$				
			Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5
Interior	Boa	1	0,59	0,69	0,57	0,55	0,69
Exterior	Má	2	-	-	-	-	-
Exterior	Boa	0,5	-	-	-	-	-

Fonte: Próprio Autor (2018).

- Impacto ambiental pela concentração de  $CO_2$  no ar ( $C_s$ )

A concentração de  $CO_2$  é dada pelo somatório dos valores de concentração atmosférica, medida por meio do aparelho modelo CO-6 Plus da marca Criffer conforme Figura 3, e a concentração adicional. A concentração adicional não foi inserida nesta pesquisa, pois é aplicável apenas em obras em ambientes viciados, como por exemplo, túneis rodoviários ou locais com motores à combustão. O cálculo da concentração total de gás carbônico pode ser efetuado pela Equação 7.

$$C_s = C_{s, atm.} + C_{s, emi} \quad (7)$$

Onde:

$C_s$  = Concentração de  $CO_2$  [ $kg / m^3$ ];  
 $C_{s, atm}$  = Concentração de  $CO_2$  da atmosfera [ $kg / m^3$ ];  
 $C_{s, emi}$  = Concentração adicional de  $CO_2$  [ $kg / m^3$ ].



Figura 4 – Aparelho de medição CO-6 Plus  
Fonte: Próprio Autor (2018).

A concentração de  $CO_2$  foi medida com auxílio do aparelho CO-6 Plus, onde foram coletados os dados das obras em dois momentos no dia, o primeiro em horário de alto tráfego de veículos, entre 11 e 13 horas, registrando a média de 385 ppm ou 0,0385%; e durante o período noturno entre 19 e 20 horas, registrando médias de 363 ppm ou 0,0363%, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6. Os resultados obtidos aproximaram-se dos valores mencionados na pesquisa de Saeta e Vitaliani<sup>5</sup> (2004 apud ALMEIDA; SALES, 2014), que afirma que as concentrações de  $CO_2$  em centros urbanos são de 0,036%, e em centros industriais de 0,045%.



(a)



(b)

Figuras 5 e 6 – Medição da concentração de  $CO_2$ , temperatura e umidade do ar da Obra 5: período diurno (a) e período noturno (b).

Fonte: Próprio Autor (2018).

<sup>5</sup> SAETTA, A.V.; VITALIANI, R.V. Experimental investigations and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: Theoretical formulation. Cement and Concrete Research, v.34, 2004.

- Coeficiente climático (W)

O parâmetro W considera as condições climáticas devido a eventos de molhamento da superfície do concreto devido às intempéries.

$$W = \left( \frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(Psr \cdot ToW)^{bw}}{2}} \quad (8)$$

Onde:

$t_0$ : tempo de referência [anos];

W: expoente do tempo [adimensional];

ToW: dias com precipitação  $\geq 2,5$  mm por ano / 365;

Psr: probabilidade de exposição de chuva [adimensional].

bw: expoente de regressão [adimensional]  $\rightarrow$  m (valor médio) = 0,446

s (desvio padrão) = 0,163

O fator ToW é dado pela média de dias com precipitação igual ou superior a 2,5 mm/ano, conforme Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo igual a 33%, a nível regional. A probabilidade de exposição a chuva é igual a zero, visto que foi definido que as vigas ensaiadas são internas e, portanto, não sofrem ação direta de chuvas. O expoente de regressão foi adotado com valor médio indicado no CEB Bulletin 34 (2006), respeitando o desvio padrão de 0,163.

- Coeficiente da resistência à carbonatação natural do concreto ( $R_c$ )

O parâmetro  $R_c$  dado pela Equação 9, é calculado através da relação do coeficiente de difusão do  $CO_2$  ( $D_{CO_2}$ ) e o teor de óxido de cálcio (a) em  $1,0 m^3$  de concreto, descritos nas Equações 10 e 11 respectivamente, sendo essa última dada por Czarnecki (2015). O coeficiente “a” é influenciado pelo grau de hidratação que, segundo Bogas (2011), aumenta em melhores condições de cura e há uma redução da porosidade, diminuindo a porcentagem de substâncias carbonatáveis, e conseqüentemente aumentando a resistência do concreto.

$$R_c = \frac{D_{CO_2}}{a} \quad (9)$$

$$D_{CO_2} = 10^{-\left(7 + 0,025 \times \frac{f_{ck}}{10}\right)} \quad (10)$$

$$a = 0,75 \times C \times CaO \times \alpha \times h \times \left( \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \right) \quad (11)$$

Onde:

$R_c$  = Resistência à carbonatação natural do concreto;

$D_{CO_2}$  = coeficiente de difusão do  $CO_2$  no concreto carbonatado ( $m^2/s$ );

a = teor de óxido de cálcio (CaO) em  $1,0 m^3$  de concreto ( $kg/m^3$ );

C = Consumo de cimento de acordo com a ABNT NBR 12655: 2015 ( $Kg/m^3$ );

CaO = Composição do Clínquer dos Cimentos Portland que varia de 59% a 67%;

$\alpha h$  = Grau de hidratação do cimento que equivale a 1,0 (POWERS, 1958);  
 $M_{CaO}$  = Massa molar de 56,0774 (g/mol);  
 $M_{CO_2}$  = Massa molar de 44,01 (g/mol).

Foi adotada resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) de 25,0 MPa para todas as obras de classe de agressividade II conforme disposto no Quadro 3. Quanto ao armazém de fertilizantes, mesmo sendo uma obra caracterizada como classe de agressividade IV adotou-se os mesmos 25,0 MPa, pois o memorial descritivo aponta essa resistência mecânica para os concretos.

Quadro 3 – Correspondência entre as classes e a qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto $kg/m^3$	CA e CP	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$
CA	Componentes e elementos estruturais de concreto armado.				
CP	Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.				

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015).

Portanto, a resistência à carbonatação pode ser calculada por meio da Equação 12.

$$R_c = \frac{10^{-\left(7 + 0,025 \times \frac{f_{ck}}{10}\right)}}{0,75 \times C \times CaO \times \alpha h \times \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}\right)} \quad (12)$$

- Comparativo entre os modelos de Tuutti (1982) e do CEB Bulletin 55 (2010)

Pelo modelo simplificado de Tuutti (1982), determinou-se o coeficiente de carbonatação *in loco*, com apenas a relação da medição da profundidade carbonatada e a idade da obra. Pelo CEB Bulletin 55 (2010), precisou-se explorar várias bibliografias afim de estimar dados para as condições climáticas da região, verificando e comparando as medições obtidas com dados de pesquisas anteriores. Tendo os coeficientes de carbonatação dos dois modelos criou-se tabelas e gráficos afim de comparar as semelhanças entre os dois métodos.

## Resultados e discussão

Após realizar a medição da concentração do CO<sub>2</sub>, foram realizados ensaios de carbonatação junto à leitura das normas e bibliografias a fim de identificar todos os parâmetros aplicáveis a cada item. Verificou-se também a umidade relativa do ar média do tempo de exposição de cada obra. Todos os resultados estão apresentados nos Quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Resultados obtidos modelo estimativo do CEB Bulletin 55 (2010)

CEB BULLETIN 55	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5
Idade [anos]	2	5	20	30	45
Ke = Coeficiente ambiental [-]	1,29474	1,52003	1,25572	1,21093	1,51902
Kc = Coeficiente de condição de cura [-]	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456
Cs = Concentração de CO <sub>2</sub> no ar [%]	0,03655	0,0392	0,03735	0,038	0,03825
W(t) = Coeficiente climático [-]	1	1	1	1	1
Rc = Resistência à carbonatação natural do concreto [(mm <sup>2</sup> /anos) / (kg/m <sup>3</sup> )]	8,756E-10	8,756E-10	6,81E-10	8,756E-10	8,756E-10
e(t) = Profundidade de carbonatação [mm]	4,88	7,64	15,36	18,64	25,65
KCO <sub>2</sub> = Coeficiente de carbonatação [mm/ano <sup>1/2</sup> ]	3,45	3,42	3,44	3,40	3,82

Fonte: Próprio Autor (2018).

Quadro 5 - Resultados obtidos Modelo de Tuutti (1982)

TUUTTI	Obra 1	Obra 2	Obra 3	Obra 4	Obra 5
Idade [anos]	2	5	20	30	45
e(t) = Profundidade de carbonatação [mm]	25,00	31,67	18,33	11,00	13,33
KCO <sub>2</sub> = Coeficiente de carbonatação [mm/ano <sup>1/2</sup> ]	17,68	14,16	4,10	2,01	1,99

Fonte: Próprio Autor (2018).

Para excluir fatores de qualidade dos materiais e da execução do concreto, considerou-se o mesmo período de cura, elemento estrutural, coeficiente climático em relação a exposição, a intempéries e resistência do concreto, alterando apenas o consumo de cimento da obra 2, por estar em classe de agressividade diferente das outras obras. Inicialmente, adotou-se o tempo de cura com sete dias, considerando-se o menor tempo de cura favorecendo a situação mais propícia à rápida deterioração da estrutura. Entretanto, após análises dos resultados, padronizou-se o período de cura de vinte e oito dias, observando-se que os valores dos coeficientes ambientais e coeficientes de cura foram inferiores a 1,0, pois quanto menor a relação entre eles, melhor deve ser considerada a qualidade de execução da obra. Portanto, devido à falta de informações registradas sobre os tempos de cura, considerou-se a situação mais favorável à qualidade do concreto.

Coletados os dados, foram elaborados os Quadros 4 e 5 determinando as profundidades e coeficientes de carbonatação pelos modelos de Tuutti (1982) e CEB Bulletin 55 (2010),

gerando gráficos com os valores obtidos para análise de comparações de resultados conforme dados apresentados nas Figuras 7 a 9.

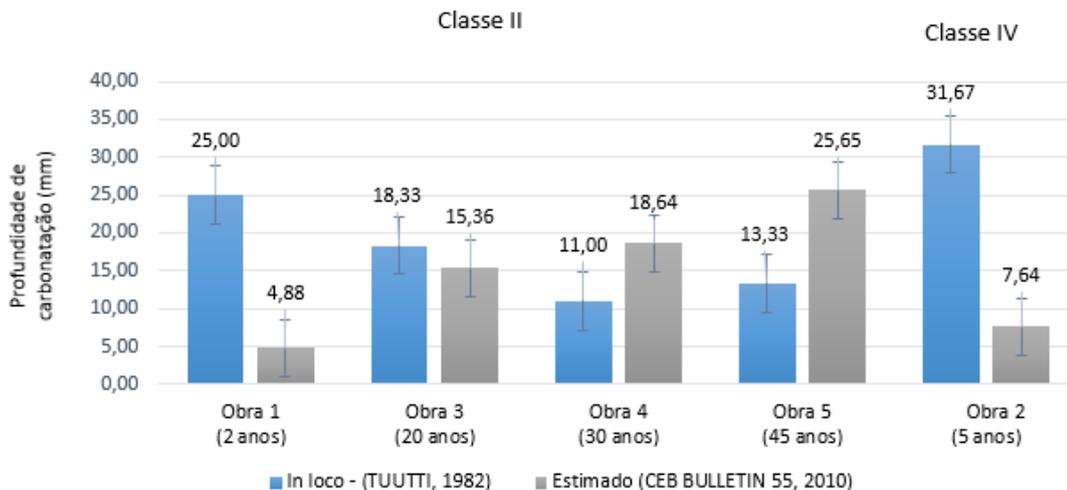


Figura 7 – Profundidade de carbonatação  
Fonte: Próprio Autor (2018).

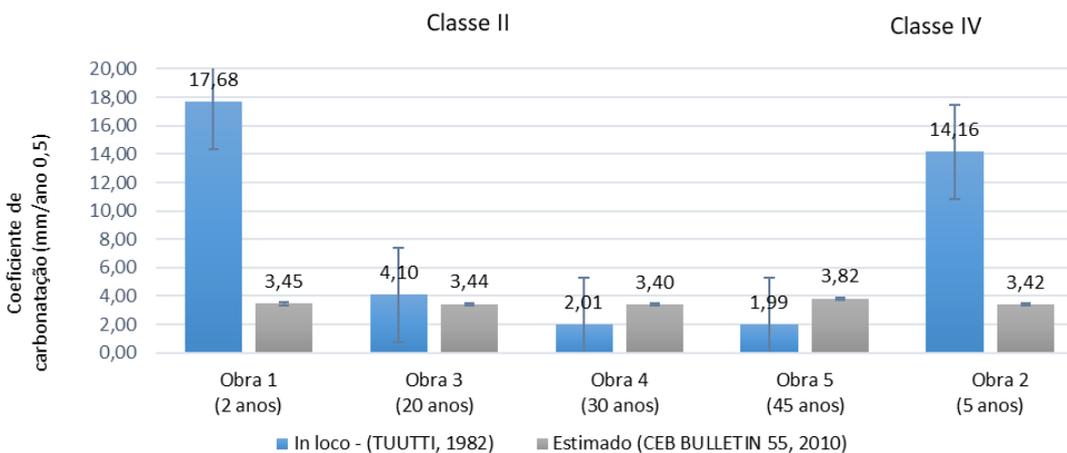


Figura 8 – Coeficiente de carbonatação  
Fonte: Próprio Autor (2018).

Analisando a Figura 7, é possível notar que a obra 1 excede os valores toleráveis de profundidade de carbonatação, pois provavelmente não houve controle de qualidade na produção e execução do concreto utilizado na obra. Portanto seria preciso realizar uma anamnese da obra para que seja provada essa hipótese. Foi possível identificar que a idade da obra e as condições de exposição não são as únicas variáveis que influenciam na velocidade de carbonatação do concreto. Sendo assim, percebe-se que é necessário que os profissionais da construção se atentem para a realização de controle tecnológico adequado do material utilizado nas estruturas.

De acordo com as Figuras 7 e 8, a obra 2 possui valores críticos em relação as obras citadas anteriormente, com uma profundidade de carbonatação de 31,67 mm e coeficiente de 14,16 mm. Isto se dá ao fato da mesma ser uma edificação industrial com classe de

agressividade ambiental IV, possuindo um elevado risco de deterioração da estrutura. Além disso, foi utilizado concreto de 25 MPa para uma obra com classe de agressividade ambiental IV, que estabelece um concreto mínimo de 40 MPa segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015) e NBR 6118 (ABNT, 2014). O galpão é utilizado para armazenamento de materiais utilizados na produção de fertilizantes, colaborando para a deterioração da estrutura e aumento da umidade.

A terceira obra em estudo, quando analisada conforme seu tempo de exposição de 20 anos, tem sua profundidade de carbonatação aceitável e valores semelhantes entre os dois métodos utilizados.

As últimas obras avaliadas, 4 e 5 respectivamente, possuem uma frente de carbonatação onde são considerados valores toleráveis devido ao tempo de exposição das mesmas. A semelhança de valores obtidos entre elas, está relacionada com o fato de ambas possuírem a mesma classe de agressividade ambiental II (urbana), além de serem obras residenciais de alto padrão, indicando que, durante o processo de projeto e execução, houve mais critério quanto à qualidade do concreto utilizado na estrutura. Sabe-se que, quanto maior o período de exposição maior a profundidade de carbonatação. Logo a quantidade de produtos carbonatados obstruindo os poros da estrutura também cresce, isso faz com que a velocidade de carbonatação seja reduzida. Além de diversos fatores que também contribuem para a redução, como por exemplo existência de revestimento, variação constante de umidade do ar, consumo de cimento, tempo de cura entre outros.

Analisando a Figura 9, é possível notar os valores de profundidade de carbonatação apresentados pelos modelos de Tuutti (1982) e CEB Bulletin 55 (2010), através dos ensaios realizados entre as obras de classe de agressividade ambiental II.

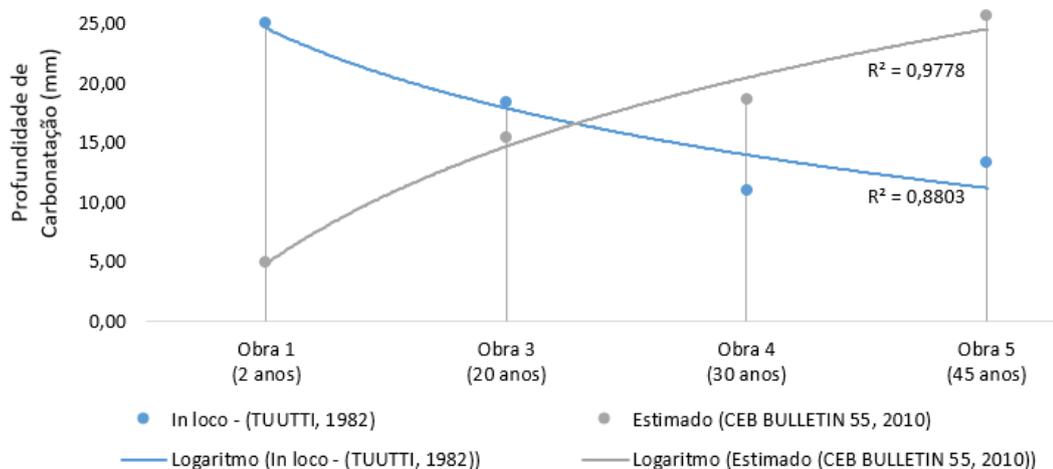


Figura 9 – Profundidade de carbonatação

Fonte: Próprio Autor (2018).

Os valores das profundidades e dos coeficientes de carbonatação, determinados pelo modelo de Tuutti (1982), estão indicados nas Figuras 7, 8 e 9. Os resultados obtidos de profundidade média e coeficiente de carbonatação foram de:

- *Obra 1:* 25,0 mm (profundidade de carbonatação) e 17,68 (coeficiente de carbonatação);
- *Obra 2:* 31,67 mm (profundidade de carbonatação) e 14,16 mm (coeficiente de carbonatação);
- *Obra 3:* 18,33 mm (profundidade de carbonatação) e 4,10mm coeficiente de carbonatação).
- *Obra 4:* 11,0 mm (profundidade de carbonatação) e 2,01mm coeficiente de carbonatação);
- *Obra 5:* 13,33 mm (profundidade de carbonatação) e 1,99 mm coeficiente de carbonatação).

Ao comparar os valores das profundidades de carbonatação estimados com os valores reais obtidos em campo, conforme Figuras 7 a 9 observa-se que os valores estimados são maiores do que os avaliados nas obras. Isso pode ser explicado pelo fato dos ensaios para formulações do CEB seguirem padrões europeus, tendendo a melhores condições de execução de estruturas de concreto de acordo com suas condições de exposição.

O modelo do CEB considera apenas coeficientes de cura, ambiente e clima, não incluindo fatores que retardam a evolução da frente de carbonatação. Conforme Campos Neto et al. (2018), a deterioração do concreto por meio da carbonatação avança numa escala logarítmica, isto é, a velocidade de carbonatação inicial é elevada em função da presença do  $\text{Ca(OH)}_2$  e à medida que o composto é consumido na reação apresentada na Equação 2, a velocidade de carbonatação estabiliza, resultando num aumento apenas da frente de carbonatação. É necessário considerar que, os minerais do concreto reduzem ao longo do tempo, isso diminui a quantidade de material alcalino que reage com o  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ .

Outro fator que contribui para o retardamento da frente de carbonatação é a resistência do concreto, pois quanto maior seu valor, menor será a permeabilidade do concreto, pois maior será a quantidade de produto hidratado, reduzindo o volume de poros capilares. Por fim, outro fator não considerado pelo modelo CEB é a existência ou não de revestimentos e pinturas na superfície dos concretos, que também podem influir no coeficiente de carbonatação da estrutura.

A vida útil de projeto das estruturas é medida através da despassivação da armadura, onde ocorre a carbonatação do concreto em torno da mesma. Na modelagem de Tuutti (1982), a deterioração das obras 4 e 5 estão de acordo com cobertura nominal para vigas em condição de agressividade ambiental II de 30 mm, trazido na NBR 6118 (ABNT, 2014) portanto, irão atingir o período de vida útil mínimo de 50 anos conforme indicado no Quadro

6. Já as demais obras, ao obterem a vida útil de projeto de 50 anos segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), ultrapassarão os 30 mm, conforme Quadro 7.

Quadro 6 – Profundidade de carbonatação para as obras aos 50 anos

Obra	KCO <sub>2</sub> (mm/ano <sup>0,5</sup> )	e(t) (mm) para 50 anos	Cobrimento Nominal (mm)	VUP atendida?
	(Tuutti, 1982)		(ABNT NBR 6118:2014)	
1	17,80	125,87	30	NÃO
2	14,16	100,13	50	NÃO
3	4,10	28,99	30	NÃO
4	2,01	14,21	30	SIM
5	1,99	14,07	30	SIM

Fonte: Próprio Autor (2018).

Quadro 7 – Vida útil de projeto (VUP)

Sistema	VUP mínima anos
Estrutura	≥ 50 segundo ABNT NBR 8681-2003
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20

Fonte: NBR 15575 (ABNT, 2013).

Após pesquisas realizadas por Campos Neto et al. (2018), encontrou-se um coeficiente de carbonatação com valores próximos a 4,0 mm/ano<sup>0,5</sup> para a cidade de Brasília (DF). Nesta pesquisa realizada na cidade de Rio Verde, foram obtidos valores próximos a 2,0 mm/ano<sup>0,5</sup>, portanto nota-se que são valores inferiores ao estudo realizado na capital nacional. Isto se dá pelo fato de que Brasília possui maior emissão de dióxido de carbono, aumentando os valores dos coeficientes e profundidades de carbonatação das estruturas de concreto.

## Conclusões

Este trabalho fundamentou-se na comparação da conservação de estruturas de concreto, avaliando a frente de carbonatação com base nas metodologias apresentadas por Tuutti (1982) e CEB Bulletin 55 (2010). Analisando vigas internas de cinco obras com diferentes idades, sendo quatro obras com mesma classe de agressividade ambiental II e uma obra com classe de agressividade IV.

Foi constatado que as obras 1 e 2 com curto período de exposição possuem uma profundidade e coeficiente de carbonatação elevado, colocando as armaduras em condições despassivadas, elevando seu potencial de corrosão, atentando-se com as condições de

exposição do material, sendo necessário preocupar-se com a qualidade do concreto utilizado nas estruturas. A obra 3 possui uma profundidade de carbonatação consideravelmente adequada, devido ao seu pouco tempo de exposição. As demais obras 4 e 5, atingiram valores altos de profundidade de carbonatação devido ao fato de serem obras com grande período de exposição, possuindo fatores que influenciam diretamente no aumento da frente de carbonatação.

Considera-se que as ideias propostas pelo modelo estimado do CEB Bulletin 55 (2010) tornam-se viáveis se realizadas a nível Brasil, quando considerado o erro padrão entre as obras. Ao analisar o coeficiente de carbonatação das obras, quando em função da margem de erro, os modelos tornam-se aplicáveis, desde que as normativas referentes aos materiais, projeto, execução, uso e manutenção sejam respeitadas.

## Agradecimentos

Aos proprietários das obras estudadas, incluindo a Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano (COMIGO), pela disponibilização de horários e permitir que os pesquisadores realizassem os ensaios de campo.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 8681**: Ações e seguranças nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A. Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. **Corrosão em estruturas de concreto armado**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2014.

ANDRADE, J. A. J. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras**: iniciação por cloretos. 2001. 277 f. Tese (Doutor em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

BOGAS, J. A. **Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida**. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

CAMPOS NETO, T. F.; OLIVEIRA, A. L. A.; SABINO, M. A.; SÁNCHEZ, J. M. M.; ZANONI, V. A. G. Predição da vida útil das estruturas: Métodos de avaliação fundamentados na carbonatação do concreto. In: **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**, Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despasseamento das armaduras em estruturas de concreto sujeitas a carbonatação**. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

OLLIVIER, J. P.; TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. CASCUDO, O.; CARASEK, H. (Trad.), São Paulo: IBRACON, 2014.

CZARNECKI, L. E. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space. **Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences**, v. 63, n. 1, 2015.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. A Nova ABNT NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: **Seminário de Patologia das Construções**, 2, 2004, Porto Alegre. Proceedings... Porto Alegre: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, LEME, UFRGS, 2004. v. 1. p. 1-30

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Disponível: <<http://www.inmet.gov.br/>> Acesso em: 03 set. 2018.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. Fib Bulletin 55: **Model Code 2010**. First complete draft, v. 1, 2010.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. Fib Bulletin 34: **Model Code 2006**, for Service Life Design. 2006.

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). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

LIMA, M. G. Ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. ISAIA, G. (Ed.), v. 1, São Paulo: IBRACON, 2011.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016

PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Wexham Springs. Cement and Concrete Association, 1986.

PAULETTI, C. **Análise Comparativa de Procedimentos para Ensaios Acelerados de Carbonatação**. 2004. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2010.

POWERS, T. C. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 41, p. 1, 1958.

RILEM RECOMMENDATIONS. **CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Materials and Structures, v. 21, 1988.

RIBEIRO, D.V; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de Concreto Armado. In: **Corrosão em Estruturas de Concreto**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SPÍNDOLA, G. M.; CASCUDO, O.; CARASEK, H.; PIRES, P. F. Durabilidade das Estruturas de Concreto: Avaliação do Desempenho e Previsão de Vida Útil Quanto à Carbonatação. In: **Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.