

Efeitos da Relação Água/Cimento e do Tempo de Cura no Processo de Carbonatação de Estruturas de Concreto Armado.

Rebecca Amaral Faria¹, Sara Vieira da Silva², Tiago Ferreira Campos Neto³

Resumo

As estruturas de concreto armado estão sujeitas a diversas formas de deterioração, uma delas é a carbonatação – uma das principais – que ocorre quando o dióxido de carbono presente na atmosfera reage com o hidróxido de cálcio. Grande parte das manifestações patológicas nas edificações se dá por falhas na execução e/ou pela falta de controle de qualidade dos materiais, que sempre tendem a deixar o concreto exposto aos agentes deletérios. A fim de se evitar a corrosão das armaduras e prolongar a vida útil das estruturas, avaliou-se as influências da relação água/cimento (a/c) e do tempo de cura no processo de carbonatação. Para isso foram produzidas seis vigas com dimensões de 0,20 x 0,50 x 0,50 m divididas em dois grupos com diferentes relações a/c e tempos de cura. A avaliação da frente de carbonatação foi realizada por meio do modelo de Tuutti (1982) e CEB Bulletin 34 (2006) e CEB Bulletin 55 (2010), sendo que os fatores ambientais foram monitorados desde a moldagem das vigas. Além da relação a/c e do tempo de cura, o parâmetro mais influente na frente de carbonatação é o consumo de cimento. Quanto maior a relação a/c , menor o tempo de cura e o consumo de cimento, maior será a velocidade de carbonatação.

Palavras-chave: Durabilidade. Deterioração das estruturas. Carbonatação do concreto. Condições de exposição.

1. Introdução

Uma das principais causas de deterioração das estruturas de concreto armado é a carbonatação, que desencadeia a corrosão das armaduras (POSSAN, 2010). A carbonatação advém da superfície gerando uma frente que cria duas zonas de pH distintas, sendo uma com pH em torno de 9, área carbonatada e outra com pH maior que 12, área não carbonatada (VIEIRA, 2003). A frente avança gradativamente para o interior do concreto e quando atinge a armadura desestabiliza o filme de óxido passivante, causando assim a despassivação, tornando possível a corrosão da armadura (RIBEIRO; CUNHA, 2014). A Figura 1 representa o processo de carbonatação.

O CO_2 penetra nos poros do concreto com determinada facilidade, fluidifica-se na umidade existente na estrutura e dá origem ao ácido carbônico (H_2CO_3), conforme Equação 1, que apesar de ser ácido fraco, reage com alguns constituintes da pasta de cimento

¹ rebecca1567@hotmail.com, Graduanda em Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde.

² saravieirarv@outlook.com, Graduanda em Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde.

³ tiagocampos@unirv.edu.br, Professor Mestre, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde.

hidratada resultando em água e carbonato de cálcio (CaCO_3). O composto que reage com o ácido carbônico é o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Quando da formação do carbonato de cálcio, há um consumo dos álcalis da pasta e a consequente redução do pH da solução existente em seus poros, e na ocasião em que atingem a profundidade da armadura a deixam em condições de desenvolver um processo corrosivo, contudo, o carbonato de cálcio por si só não deteriora o concreto (ALMEIDA; SALES, 2014). A permeabilidade do concreto aos gases depende basicamente da permeabilidade da pasta de cimento, que por sua vez, depende da relação água/cimento (a/c) e do grau de hidratação do cimento (HELENE⁴, 1999 apud RIBEIRO, 2014).

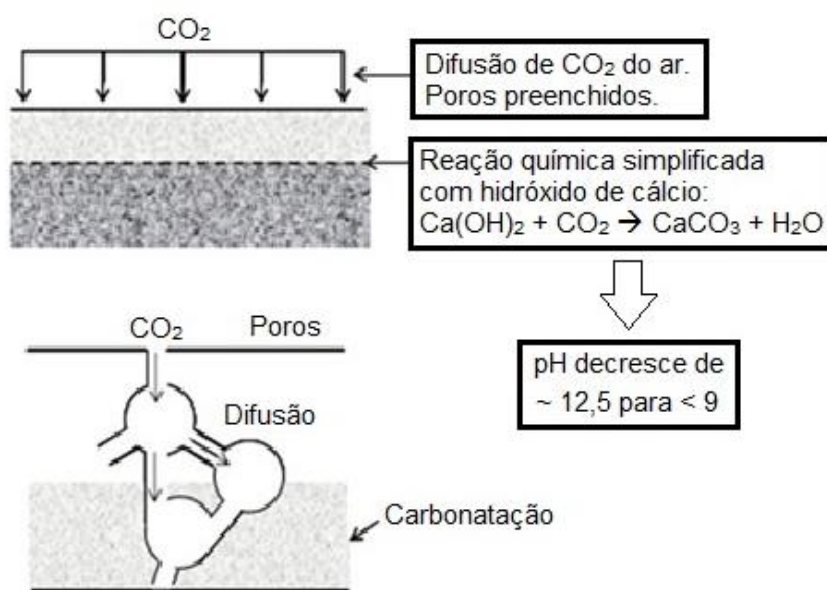
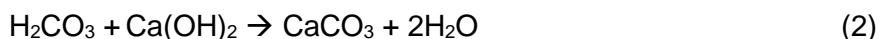


Figura 1 – Esquema representativo do processo de carbonatação
Fonte: Bakker ⁵(1988 apud Vieira, 2003).



Conforme Almeida e Sales (2014), essa ocorrência entre os componentes do cimento hidratado e o CO_2 , em processo de neutralização, que transforma compostos cimentícios em carbonatos é denominada carbonatação como descrito na Equação 2.



⁴ HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 4. ed. São Paulo: PINI: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1999. 47p.

⁵ BAKKER, R.F.M. Chapter Three. In: SCHIESSL, P. ed. Corrosion of Steel in Concrete. Report of the Technical Committee 60 – CSC. RILEM. London, Chapman & Hall, 1988. p. 36 42.

Em uma estrutura, muitos são os agentes que influenciam no coeficiente de carbonatação, sendo: a umidade relativa (U.R.) do meio ambiente, o teor de umidade, o teor de CO_2 e a permeabilidade do concreto. A eficácia da cura e a relação a/c interferem consideravelmente na permeabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2013).

De acordo com o CEB Bulletin 55 (2010), precipitação acima de 2,5 mm acaba gerando uma umidade relativa muito alta (acima de 80%), o que reduz de modo significativo a velocidade de carbonatação. Sabe-se que a velocidade de carbonatação é maior quando a umidade do ar está entre 40% e 80%, conforme a Figura 2, havendo água suficiente para provocar a dissolução do CO_2 , de modo que os poros não sejam totalmente saturados. A hipótese de que existe alguma relação da carbonatação com o ponto de orvalho não deve ser descartada, afinal, se a umidade estiver a uma determinada porcentagem e o ponto de orvalho estiver elevado, significa que haverá dificuldade do acesso de CO_2 .

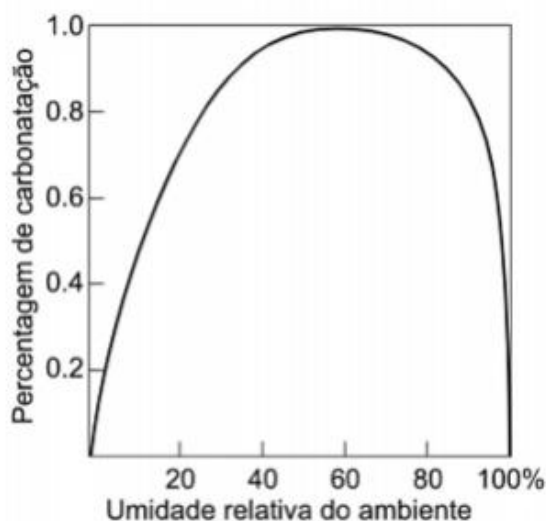


Figura 2 – Porcentagem de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente
Fonte: Lima (2011).

Segundo Possan (2004) é notório o decréscimo do coeficiente de difusão quando a umidade relativa dos poros ultrapassa 60%. Conforme Ribeiro e Cunha (2014), a carbonatação é facilitada quando a qualidade do concreto não é adequada. Elevada relação a/c, pequenas espessuras de cobrimento, reduzidas quantidades de cimento e ciclos de umedecimento e secagem são condicionantes à celeridade de carbonatação. Oposto a isso, metodologia de cura satisfatória, grandes quantidades de hidróxido de cálcio, adição de cinzas volantes pozolânicas, boa compactação, além de outros fatores que, desaceleram o processo.

A crescente hidratação do cimento justifica a tendência à estabilização. Gradualmente a compacidade do concreto é aumentada desde que se tenha água suficiente. Alia-se a isso a ação dos produtos da transformação, que também colmatam os poros superficiais,

dificultando o acesso de CO₂, além do material provindo do meio externo, que adentra ao interior do concreto (RIBEIRO; CUNHA, 2014; HELENE⁶, 1986 apud POSSAN, 2010). O carbonato de cálcio precipita no interior dos poros, por ter solubilidade muito baixa diminui a porosidade do concreto e, conseqüentemente, isso causa dificuldade no avanço da frente de carbonatação (MONTEMOR *et al.*, 2002).

Helene (1999) cita que a permeabilidade aos gases é reduzida em ambientes cuja umidade seja eminente e que esta juntamente com água, quando nos poros, inibem o fluxo dos gases, além do eventual aparecimento de microfissuras de retração na face exterior do concreto. Isso justifica o célebre fato de se observarem maiores profundidades de carbonatação em locais com climas mais secos (U.R. < 80 %), ou sujeitos a ciclos de umedecimento e secagem.

1.1. Objetivos

- Geral

Avaliar a influência da relação a/c e do tempo de cura no processo de carbonatação de elementos em concreto armado.

- Específicos

- Comparar dados obtidos pelo modelo de Tuutti (1982) com dados estimados pelas normativas europeias CEB Bulletin 34 (2006) e CEB Bulletin 55 (2010);
- Analisar o impacto de fatores ambientais no avanço da frente de carbonatação.

2. Materiais e métodos

Após a definição do tema, foi realizado um estudo bibliográfico em artigos publicados, livros e normas, para que fosse possível entender o processo da carbonatação. A pesquisa seguiu o fluxograma de atividades apresentado na Figura 3.

⁶ HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 47p.

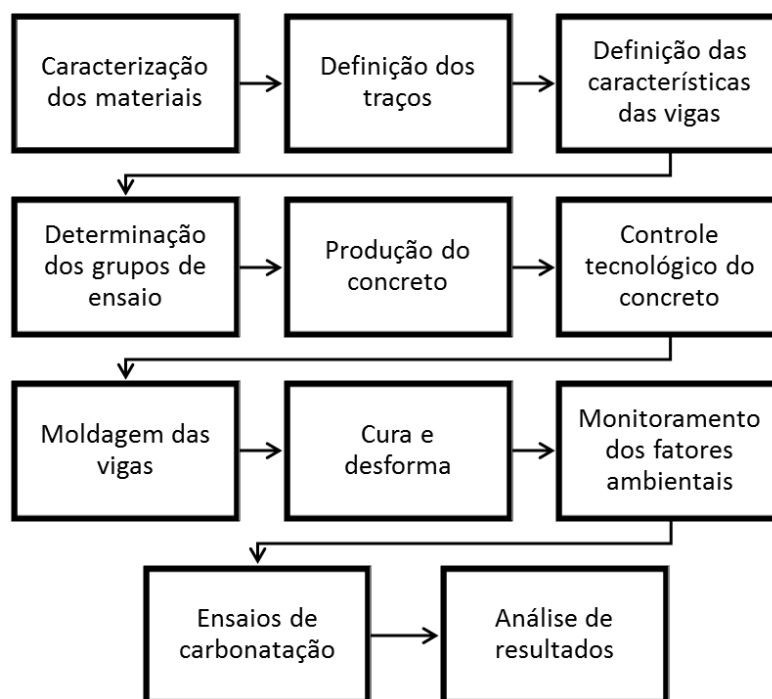


Figura 3 – Fluxograma das etapas de projeto
Fonte: Próprio Autor (2018).

2.1. Caracterização dos Materiais

Foi utilizado o CII-F-40 (cimento Portland composto com fíler), com classe de resistência de 40,0 MPa com as especificações regulamentadas na ABNT NBR 16697:2018, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Exigências físicas e mecânicas

Características e propriedades		Limite de classe	Resultado encontrado
		40	
Finura	Resíduo na peneira 75 µm	≤ 10,0 %	0,276 %
	Área específica	≥ 280,0 m ² /kg	477,96 m ² /kg

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018).

Os agregados graúdos e miúdos utilizados foram devidamente caracterizados com suas definições avaliadas conforme requisitos da ABNT NBR 7211:2011. Utilizou-se o aditivo Mira Set 38 da marca Grace com função dispersante e retardador de pega, cuja aparência é líquida marrom escuro, pH de 6,31 e massa específica de 1,141 g/cm³, sendo isento de cloretos e atendendo as especificações da ABNT NBR 11768:2007.

2.2. Definição do Traço

Os traços fornecidos por uma usina de concretagem se diferem no que tange às resistências mecânicas, à relação a/c e no consumo dos materiais. O traço com maior relação a/c (0,96) possui menor resistência mecânica, atingindo 15,0 MPa; o traço de relação a/c 0,75 foi dosado para atingir 25,0 MPa; e, por fim, o traço de relação a/c 0,57 foi dosado para atingir 40,0 MPa. Os concretos receberam os nomes C15, C25 e C40 respectivamente, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Consumos das misturas em kg/m³

MISTURA	C 15	C 25	C 40
CIMENTO	193,0	236,0	314,0
AREIA NATURAL	653,0	628,0	555,0
AREIA ARTIFICIAL	400,0	380,0	340,0
BRITA 9,5 MM	420,0	435,0	445,0
BRITA 19,0 MM	585,0	600,0	630,0
ADITIVO	1,25	1,53	2,04
ÁGUA	185,0	177,0	179,0

Fonte: Usina de concretagem (2018).

2.3. Definição das características das vigas

Para avaliação do impacto da relação a/c e do tempo de cura na frente de carbonatação dos concretos, foram moldadas seis vigas em concreto armado nas dimensões 0,20 x 0,50 x 0,50 m com as respectivas relações a/c 0,57, 0,75 e 0,96, sendo duas vigas para cada traço.

Para as armaduras da viga adotou-se estribos com diâmetro de 5,0 mm com espaçamento de 14,0 cm em 14,0 cm entre si, sendo este espaçamento adotado conforme ABNT NBR 6118:2014, atendendo tanto no aspecto de altura útil quanto no aspecto de esforço cortante. Para a armadura negativa, o diâmetro utilizado foi de 8,0 mm sendo colocados dois vergalhões na parte superior da viga. A armadura positiva com diâmetro de 10,0 mm com dois vergalhões na parte inferior da viga. Todas as barras atendem aos requisitos exigidos na ABNT NBR 7480:2007. A Figura 4 mostra o detalhamento das vigas executadas.

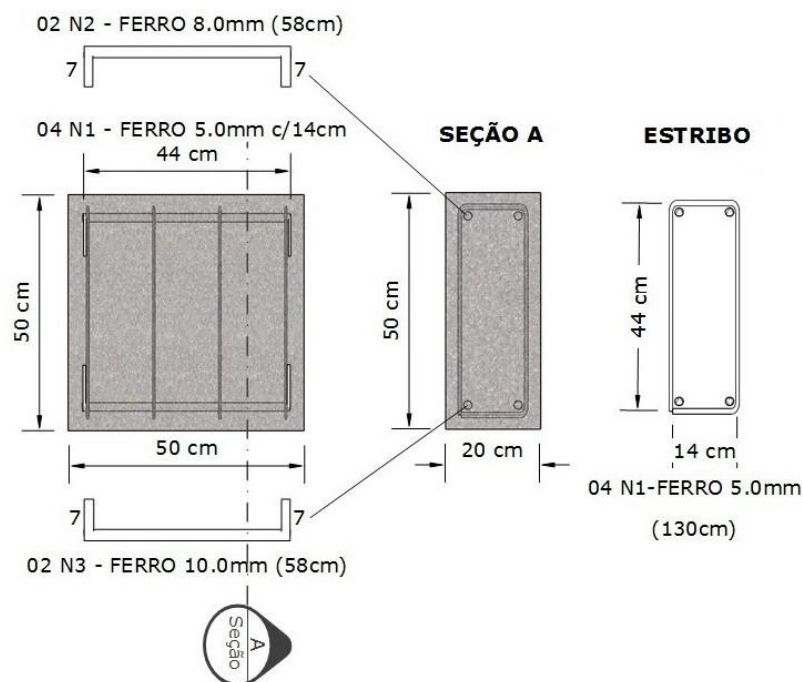


Figura 4 – Detalhamento das vigas
Fonte: Próprio Autor (2018).

2.4. Determinação dos grupos de ensaio

Conforme mostrado na Figura 5, as seis vigas foram divididas em dois grupos de ensaio, sendo que as do primeiro não receberam nenhum tipo de cura e as do segundo, foram curadas por molhagem por sete dias. As vigas do segundo grupo foram curadas com água três vezes ao dia. Cada grupo apresenta vigas com relações a/c diferentes, sendo 0,57, 0,75 e 0,96.

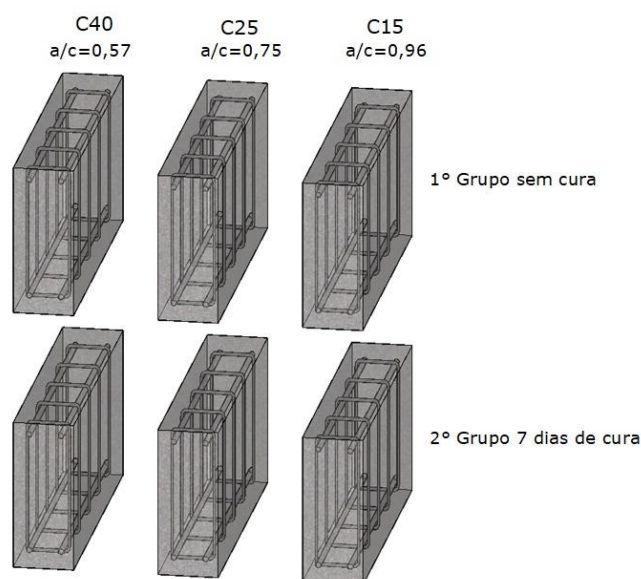


Figura 5 – Grupos de ensaio
Fonte: Próprio Autor (2018).

2.5. Produção do concreto

As misturas dos concretos foram realizadas em betoneira com capacidade nominal de 370 litros, respeitando a sequência de lançamento dos materiais na betoneira e o tempo de amassamento do concreto seguiu os procedimentos conforme ASTM C 192 (2014). Após finalizada a betonada e respeitado o período de repouso, o concreto foi lançado em carrinhos de mão e transportado até o local da concretagem.

2.6. Controle tecnológico do concreto

Para cada concreto foram retirados três corpos de prova para romper aos 28 dias, sendo estes moldados de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 e rompidos em conformidade com a ABNT NBR 5739:2018, sendo então verificada a resistência à compressão de cada traço. Para o controle tecnológico do concreto no estado fresco, foi realizado o *slump test* que é o abatimento do tronco de cone para medir a consistência e a fluidez de acordo com a NBR NM 67:1998 (Figura 6). A Tabela 2 mostra os resultados obtidos.

Tabela 2 – Abatimento do tronco do cone de concreto

Traço	<i>Slump test</i> (mm)	fck (MPa)
C15	225	13,23
C25	155	27,78
C40	140	45,75

Fonte: Próprio Autor (2019).



Figura 6 – *Slump test*
Fonte: Próprio Autor (2019).

2.7. Moldagem das vigas

As vigas dos concretos C15 e C25 foram moldadas nos dias 22 de fevereiro de 2019 e as vigas do C40 no dia 23 de fevereiro de 2019. As fôrmas utilizadas foram produzidas em madeira com placas de compensado para manter a geometria das seis peças estruturais, garantindo estanqueidade do concreto no estado fresco para que não ocorresse vazamento de nata, até que o concreto se tornasse autoportante. Não foi realizado o projeto de fôrma, porém houve o cuidado de conferir o alinhamento dos painéis laterais das vigas, garantindo o travamento dos mesmos com gravatas para que não ocorresse nenhum tipo de mobilidade do conjunto. Todas as fôrmas foram devidamente umedecidas antes da aplicação do desmoldante. A viga foi concretada em camadas, o concreto foi adensado através de golpes nas fôrmas com marreta de borracha. A Figura 7 apresenta um esboço do sistema de fôrmas utilizado e a Figura 8 registra o processo de moldagem.

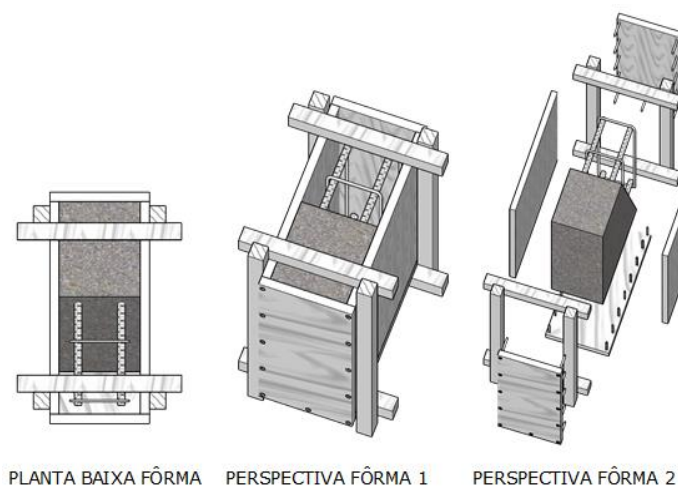


Figura 7 – Esboço do sistema de fôrmas
Fonte: Próprio Autor (2018).



Figura 8 – Moldagem das vigas
Fonte: Próprio Autor (2019).

2.8. Cura e desforma

O processo de cura foi realizado por meio da umidificação das superfícies das vigas garantindo que as mesmas estivessem a maior parte do tempo, saturadas. Os tempos de cura adotados foram de zero e sete dias. A desforma foi realizada com equipamento adequado evitando choques ou vibrações excessivas que colocassem em risco a integridade do concreto, impedindo o surgimento de fissuras ou prejudicando a aderência do concreto com a armadura. Os processos de cura e desforma foram executados conforme recomendações da ABNT NBR 14931:2004.

2.9. Monitoramento dos fatores ambientais

As condições ambientais começaram a ser monitoradas no momento da execução do concreto, sendo que após a desforma, foram medidas novamente para avaliação da frente de avanço da deterioração do concreto das vigas. Este monitoramento ocorreu através do medidor de dióxido de carbono modelo CO-6plus da Criffer, além de dados obtidos da estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) localizada nas instalações da Universidade de Rio Verde.

Através dos dados disponibilizados pelo INMET, conseguiu-se por meio de média valores de máximo e mínimo de temperatura e umidade, os quais foram inseridos numa planilha eletrônica possibilitando os cálculos.

2.10. Ensaios de carbonatação

Os ensaios *in loco* (Figura 9) foram realizados conforme o passo a passo abaixo:

- I. Com uma picola foi realizada uma escarificação na superfície do concreto com profundidade igual ou inferior ao cobrimento nominal de 30 mm exigidos na NBR 6118 (ABNT, 2014);
- II. Na região escarificada foi borrifada solução de fenolftaleína a 1,0% conforme solicitado por Helene (1993);
- III. Após a aplicação da solução foi realizada a medição da profundidade da frente de carbonatação com auxílio de paquímetro universal. A medição foi realizada em três pontos distintos, sendo adotado como resultado a média dos três pontos.



Figura 9 – Realização do ensaio nas vigas
Fonte: Próprio autor (2019).

Para a determinação da velocidade de carbonatação foi utilizada a metodologia descrita a seguir. Em posse da profundidade de carbonatação medida *in loco* por meio do método anteriormente citado e considerando o tempo de exposição das vigas, foi calculado o coeficiente de carbonatação utilizando-se o modelo de Tuutti (1982), conforme Equação 3.

$$x_c = k_{CO_2} * \sqrt{t} \quad (3)$$

Onde: x_c = profundidade de carbonatação [mm];

k_{CO_2} = coeficiente de carbonatação [mm/ano^{0,5}];

t = tempo de exposição [ano].

Esses coeficientes, bem como as profundidades reais de carbonatação, foram utilizados posteriormente para comparação com valores estimados através da Equação 4, dispostas nas normativas CEB Bulletin 34 (2006) e CEB Bulletin 55 (2010).

$$x_c = \sqrt{2 * k_e * k_c * R_c * C_{CO_2} * \sqrt{t} * w} \quad (4)$$

Onde: x_c = profundidade de carbonatação [mm];

k_e = coeficiente ambiental [adimensional];

k_c = coeficiente de cura [adimensional];

R_c = resistência efetiva à carbonatação [(mm²/ano)/(kg/m³)];

C_{CO_2} = concentração de CO₂ [%];

t = tempo de exposição [s];

w = coeficiente climático [adimensional].

O cálculo do coeficiente ambiental (k_e) foi realizado conforme Equação 5. Os valores da umidade relativa do ar reais foram retirados do site do INMET, ao passo que, para os valores de umidade relativa de referência adotou-se 65% de acordo com o método acelerado de avaliação de carbonatação (ACC), do CEB Bulletin 34 (2006). Os valores dos expoentes $g_e = 2,5$ e $f_e = 5,0$, também foram retirados do método ACC.

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

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].

O coeficiente de condição de cura foi determinado de acordo com a Equação 6. Os tempos de cura foram inseridos conforme Figura 5. Foi fixado um valor médio para o expoente de regressão, além de um desvio padrão tolerável.

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

Onde: bc = expoente de regressão [adimensional];

t_c = período de cura [dias];

$bc = -0,567$;

Sd = desvio padrão = 0,024 [adimensional].

A concentração de CO_2 é obtida através da Equação 7. Os valores de concentração de CO_2 na atmosfera e adicional foram obtidos por meio do aparelho CO-6 Plus da marca Criffer, obtendo-se uma média de 0,039%.

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

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].

A resistência à carbonatação do concreto é definida pela Equação 8. Obtida através da relação da difusividade do CO_2 e o teor de óxido de cálcio (CaO) presente em cada metro cúbico de concreto.

$$R_c = \frac{D_{co2}}{a} \quad (8)$$

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 $1,0m^3$ de concreto [kg/m^3];

Por sua vez, a difusividade do CO_2 depende da resistência característica do concreto, de acordo com a Equação 9. As resistências características dos concretos foram obtidas por meio de ensaios de compressão de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) e estão descritas na seção de resultados.

$$D_{CO_2} = 10^{-\left(7 + 0,025 \times \frac{f_{ck}}{10}\right)} \quad (9)$$

A Equação 10 define o teor de óxido de cálcio em $1,0m^3$ de concreto. É necessário o valor de consumo de cimento, sendo esse valor utilizado correspondente ao de cada traço. O teor de CaO presente em $1m^3$ de cimento foi fornecido pelo fabricante, sendo este 60%. Realizou-se uma interpolação para encontrar o valor do grau de hidratação conforme Quadro 2. Os valores das massas molares são fixos para cada molécula.

$$a = 0,75 \times C \times CaO \times \alpha h \times \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}\right) \quad (10)$$

Onde: a = teor de óxido de cálcio (CaO) em $1,0m^3$ 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%;
 αh = grau de hidratação do cimento que equivale a 1,0 (POWERS, 1958) [adimensional];
 M_{CaO} = massa molar de 56,0774 [g/mol];
 M_{CO_2} = massa molar de 44,01 [g/mol].

Quadro 2 – Grau de hidratação em função da relação a/c

a/c	αh (%)
0,4	60
0,6	70
0,8	80

Fonte: Byfors⁷ (1980 apud Tuutti, 1982).

Para obtenção do coeficiente climático utiliza-se a Equação 11. É necessário realizar a média de dias com precipitação igual ou superior a 2,5 mm/ano para o fator ToW. No primeiro mês as vigas ficaram expostas por onze dias com chuva, até o segundo mês foram dezesseis dias e por último, dezessete dias até o terceiro mês, conforme dados obtidos do INMET. O

⁷ BYFORS, J. Plain Concrete at Early Ages. Stockholm, 1980. Research report Fo 3:80 - Cement – och Betonginstitutet.

expoente de regressão adotado foi recomendado pelo CEB Bulletin 34 (2006), respeitando o desvio padrão.

$$W = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(Psr \cdot ToW)^{bw}}{2}} \quad (11)$$

Onde: t_0 = tempo de referência [anos];

t = tempo de vida da viga [anos];

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

pSR = probabilidade de exposição à chuva [adimensional];

bw = expoente de regressão [adimensional].

m (valor médio) = 0,446

s (desvio padrão) = 0,163

3. Resultados e discussões

3.1. Resistência à compressão

Foram produzidos três traços (C15, C25 e C40) cuja nomenclatura deriva das resistências característica à compressão esperadas. Durante a produção das misturas foi realizado o controle tecnológico e os resultados das resistências características à compressão dos concretos estão apresentadas na Figura 10.

Os concretos C25 e C40 atingiram valores superiores ao esperado, chegando a 27,78 MPa e 45,75 MPa, respectivamente. Apenas o C15 não atingiu o valor esperado, entretanto este não é um concreto estrutural e o objetivo dessa pesquisa se funda na análise da durabilidade da mistura.

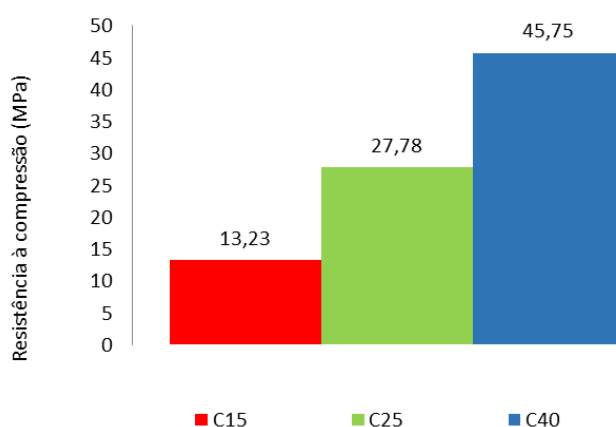


Figura 10 – Resistência à compressão
Fonte: Próprio Autor (2019).

3.2. Análise dos dados obtidos pelo modelo estimativo europeu

Com os valores obtidos e apresentados na Figura 11, observou-se que o tempo de cura, a relação a/c e o consumo de cimento influenciam na profundidade de carbonatação (Figura 12).

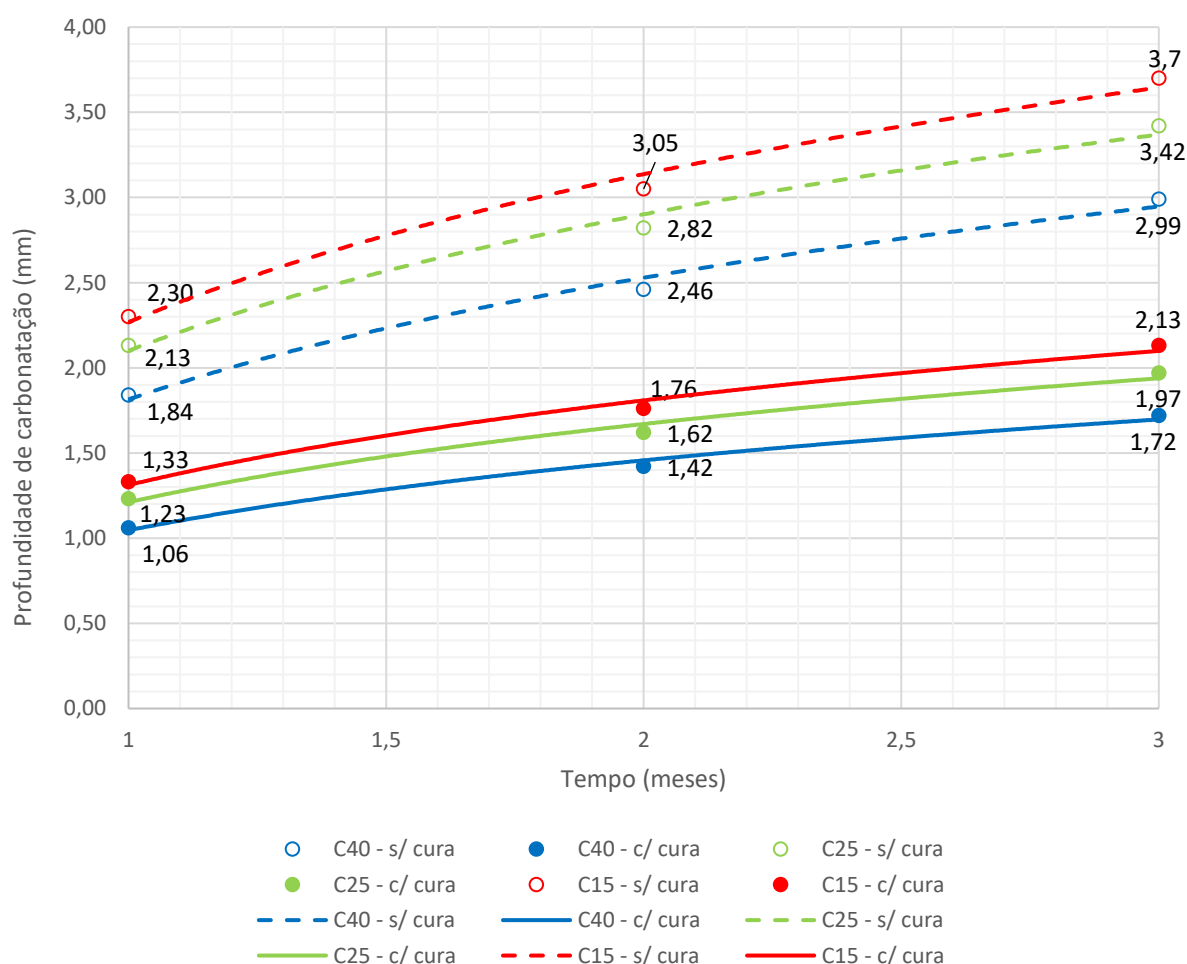


Figura 11 – Frentes de carbonatação pelo método de CEB Bulletin 55
Fonte: Próprio autor (2019).

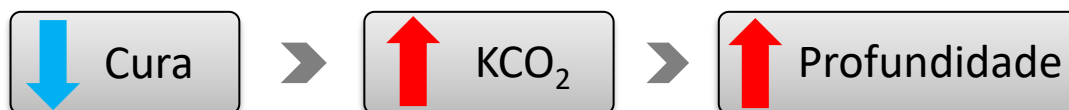


Figura 12 – Efeitos do tempo de cura na carbonatação do concreto
Fonte: Próprio autor (2019).

No primeiro mês as vigas sem cura apresentaram profundidade de carbonatação com valores superiores em relação às vigas curadas, esse padrão se estendeu também para o segundo e terceiro mês.

Mediante valores obtidos observou-se que o tempo de cura influencia de modo considerável na profundidade de carbonatação. Quando se observa do primeiro para o terceiro mês, a frente de carbonatação aumenta para todos os concretos, de modo que quanto menor o tempo de cura, maior a profundidade. Fazendo a comparação dos resultados entre vigas com e sem cura, é possível notar que com o passar do tempo a porcentagem de aumento da deterioração é maior nos concretos sem cura, apresentando valores superiores a 70%, portanto, a cura influencia de fato em todo o período de vida útil da estrutura.

A relação a/c é outro parâmetro importante, que atua na resistência do concreto (NEVILLE, 1997). Desse modo, entende-se que quanto maior a relação a/c , menor será a resistência do concreto, conseqüentemente influenciando também na taxa de deterioração e na profundidade de carbonatação (Figura 13). Aos três meses, as vigas C15 expressaram para profundidade de carbonatação, valores superiores com relação a C25, que por sua vez foram maiores que nas vigas C40.

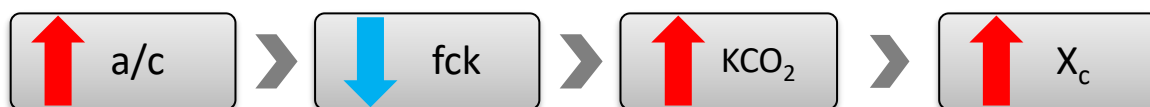


Figura 13 – Efeitos da relação a/c na carbonatação do concreto
Fonte: Próprio autor (2019).

No que tange à análise da relação a/c , não foi possível mensurar as porcentagens de variação entre os concretos, visto que os concretos não variam apenas o teor de água, mas também os consumos de cimento e os graus de hidratação.

Para verificar qual dos fatores mais influencia na frente de carbonatação no modelo europeu, dobrou-se e reduziu-se pela metade os valores do consumo de cimento, tempo de cura e f_{ck} . Notou-se que ao reduzir o consumo de cimento pela metade a frente de carbonatação aumentaria aproximadamente 40%, e ao dobrar o consumo a frente reduziria em torno de 30%. No que tange ao tempo de cura, ao reduzir para três dias, a deterioração pode ser até 30% maior, e ao aumentá-lo para quatorze dias, pode aumentar em até 20%. Quanto ao f_{ck} , ao aumentá-lo é possível reduzir a deterioração em aproximadamente 10%. Os outros fatores também foram analisados, entretanto apresentaram porcentagens de impacto às supracitadas.

3.3. Análise dos dados obtidos pelo modelo de Tuutti

O gráfico apresentado na Figura 14 explicita os dados encontrados em campo. As profundidades de carbonatação nas vigas com cura apresentaram valores superiores aos das vigas sem cura, se distorcendo da teoria de que quanto maior o tempo de cura, menor a frente

de carbonatação. O concreto com idade de um mês não está totalmente hidratado, ou seja, ainda tem uma quantidade significativa de poros, então é natural que a deterioração ocorra de maneira acelerada nas primeiras idades. Por não ser um material homogêneo, é esperado que a diferença de profundidade de carbonatação das vigas com e sem cura ocorra. Diante disso, é possível que as redes internas de poros capilares nos locais ensaiados sejam extensas, seja pela presença de água do processo de cura ou em decorrência do processo de hidratação, entretanto mais pesquisas seriam necessárias para se avaliar essa hipótese.

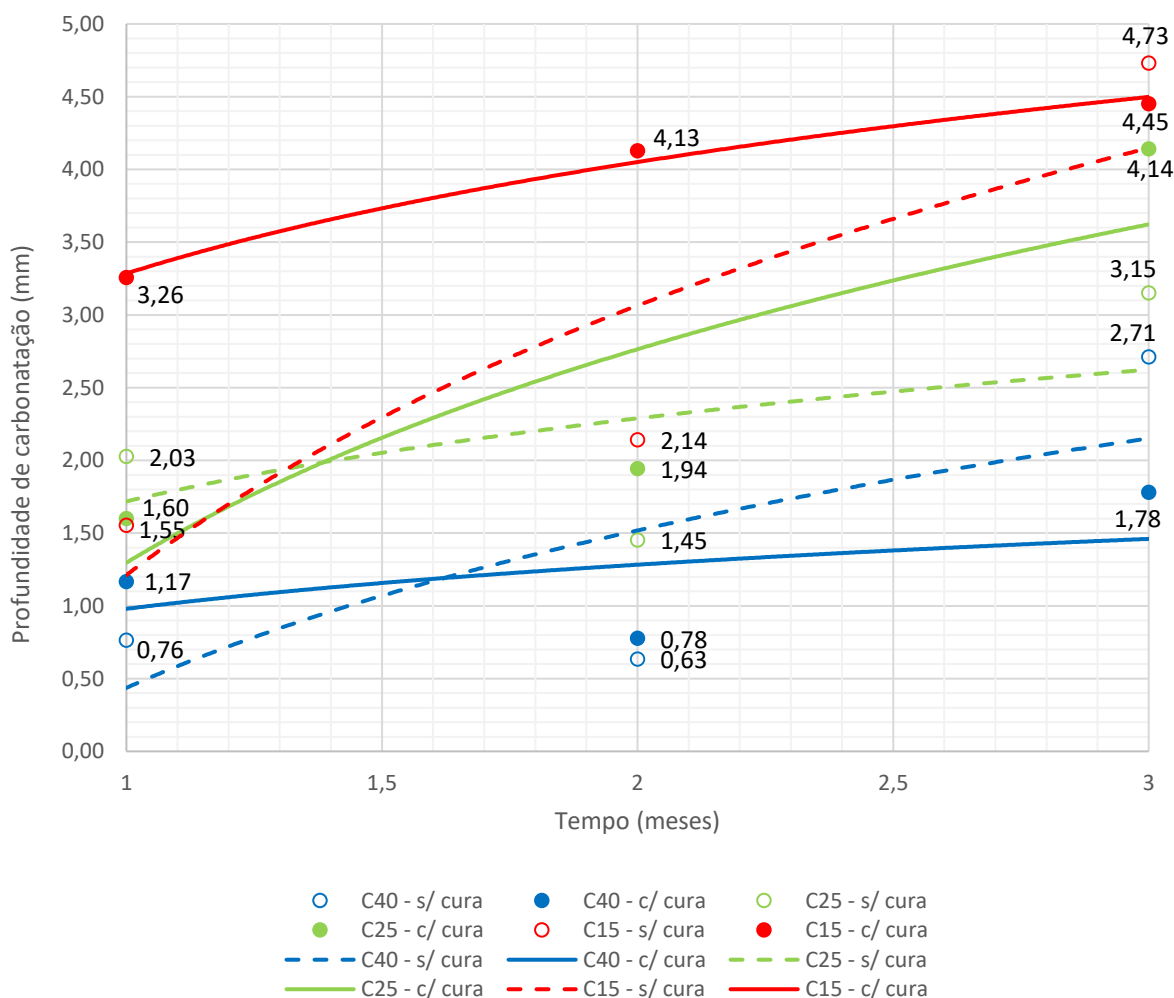


Figura 14 – Frentes de carbonatação método de Tuutti
Fonte: Próprio autor (2019).

Com base em estudos bibliográficos, a expectativa era de que quanto maior a resistência característica do concreto (f_{ck}), menor seria a velocidade de deterioração, sendo assim comprovado durante os ensaios em campo (Figura 15). Os valores obtidos seguiram o mesmo parâmetro do estimado, as vigas com maior relação a/c apresentaram maior

profundidade carbonatada, pois quanto menor a resistência do concreto, mais porosa será a microestrutura da mistura, elevando a difusividade do CO₂, acelerando a carbonatação.

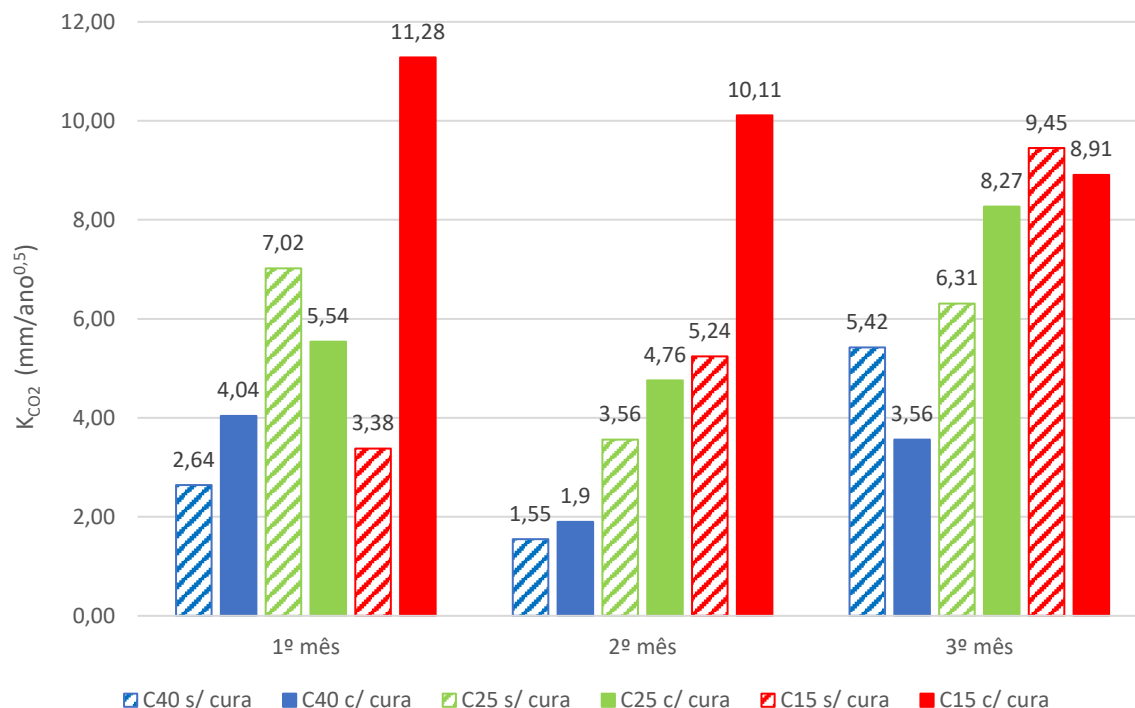


Figura 15 – Velocidade de carbonatação
Fonte: Próprio autor (2019).

É possível observar uma diferença de resultados (K_{CO_2}) do primeiro para o terceiro mês, onde as vigas sem cura C40 e C15 possuem uma taxa de aumento, de 105,30% e 179,59% respectivamente, já a viga C25 possui uma queda de 10,11%. As vigas com cura C40 e C15 caíram 11,88% e 21,01% nesta ordem, entretanto a C25 se elevou com 49,28%. Com exceção da C25, as vigas com cura apresentaram uma taxa de queda enquanto as vigas sem cura se elevaram significativamente. Esse resultado é esperado porque aos poucos o concreto vai se hidratando, com isso os poros vão se obstruindo dificultando cada vez mais a penetração do CO₂, pois quanto maior o grau de hidratação, menor será a porosidade.

3.4. Comparação dos resultados reais com os estimados

Após a análise comparativa entre os dois métodos (Figura 16), de forma a avaliar se o modelo estimado se aproxima do valor real, chegou-se à conclusão que as frentes de carbonatação medidas em campo aproximaram-se dos valores estimados pela norma europeia. Portanto, acredita-se que o modelo europeu seja aplicável no Brasil, entretanto é preciso considerar os desvios nas análises de resultados.

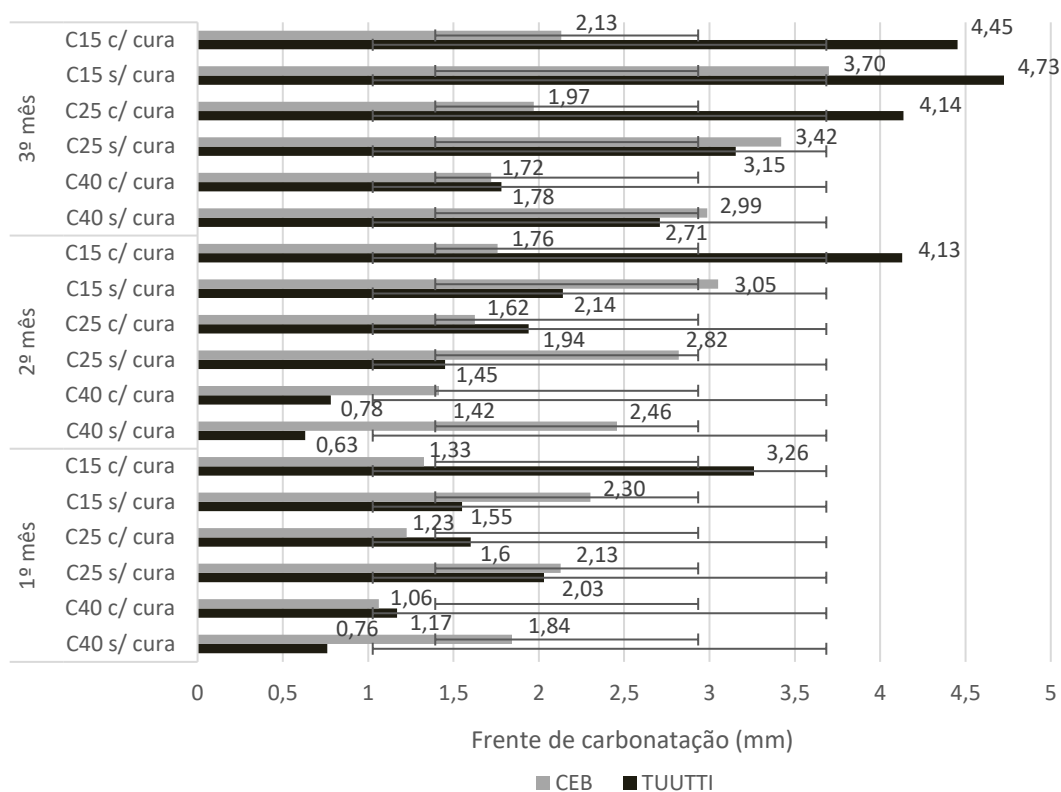


Figura 16 – Frentes de carbonatação estimadas e reais
Fonte: Próprio autor (2019).

A Tabela 3 apresenta os dados de frente e coeficiente de carbonatação dos concretos nos três primeiros meses. Foi possível identificar uma variação entre o modelo CEB Bulletin 55 (2010) e a medição *in loco*. O primeiro mês apresentou um padrão na profundidade de carbonatação: onde o valor medido em capo é maior que CEB em vigas com cura, porém, menor em vigas sem cura. No segundo mês este padrão se manteve com exceção da C40 com cura, onde a profundidade de carbonatação medida foi menor do que o estimado pelo CEB.

Analisando os resultados medidos do primeiro mês, as vigas C40 e C15 curadas tiveram maior profundidade de carbonatação ao contrário da C25, no segundo mês todas as vigas curadas apresentaram maior profundidade de carbonatação em relação às vigas sem cura, o que contradiz com o CEB. A diferença de resultado entre o estimado e o real, se dá pela diferença climática e também pela qualidade do concreto no que tange à dosagem, produção e aplicação da mistura.

As normas europeias consideram em suas equações apenas aspectos climáticos, não incluindo preenchimento dos poros com o produto da carbonatação (CaCO_3), que acaba por

obstruí-los dificultando o acesso do CO₂ e, conseqüentemente, alterando o coeficiente (CAMPOS NETO, 2015; HELENE⁸, 1986 apud POSSAN, 2010).

Tabela 3 – Profundidades e coeficientes de carbonatação estimados e reais

1º mês	Idade (anos) = 0,083333333											
	C15 s/cura		C15 c/ cura		C25 s/cura		C25 c/ cura		C40 s/cura		C40 c/ cura	
	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real
X _c (t) (mm)	2,30	1,55	1,33	3,26	2,13	2,03	1,23	1,60	1,84	0,76	1,06	1,17
K _{co2} (mm/ano ^{0,5})	8,17	5,38	4,71	11,28	7,55	7,02	4,35	5,54	6,54	2,64	3,77	4,04

2º mês	Idade (anos) = 0,166666667											
	C15 s/cura		C15 c/ cura		C25 s/cura		C25 c/ cura		C40 s/cura		C40 c/ cura	
	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real
X _c (t) (mm)	3,05	2,14	17,6	4,13	2,82	1,45	1,62	1,94	2,46	0,63	1,42	0,78
K _{co2} (mm/ano ^{0,5})	7,59	5,24	4,37	10,11	7,01	3,56	4,04	4,76	6,11	1,56	3,52	1,9

3º mês	Idade (anos) = 0,25											
	C15 s/cura		C15 c/ cura		C25 s/cura		C25 c/ cura		C40 s/cura		C40 c/ cura	
	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real
X _c (t) (mm)	3,70	4,73	2,13	4,45	3,42	3,15	1,97	4,14	2,99	2,71	1,72	1,78
K _{co2} (mm/ano ^{0,5})	7,45	9,45	4,29	8,91	6,89	6,31	3,97	8,27	6,05	5,42	3,48	3,56

Fonte: Próprio autor (2019).

A deterioração do concreto se dá em escala logarítmica, ou seja, tem-se no início uma velocidade considerável, devido à presença do Ca(OH)₂, e conforme o composto é consumido nas reações químicas, essa velocidade é reduzida, resultando num avanço lento da frente de carbonatação (CAMPOS NETO et al., 2018). A carbonatação não cessa de fato, porém acontece numa velocidade muito baixa, passando a serem imperceptíveis os efeitos da sua ocorrência ao longo do tempo, sendo seus efeitos desprezados (HELENE, 1999).

⁸ HELENE, P; R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986. 47p.

Segundo Meyer⁹ (1969 apud POSSAN, 2010), quanto menor a quantidade de produtos carbonatáveis maior a velocidade de carbonatação. Pode ser levado em conta também o fato de que o modelo europeu considera somente a reação química do Ca(OH)_2 com o CO_2 – por ser a principal – entretanto existem outros gases ácidos, como o gás sulfídrico (H_2S) e o dióxido de enxofre (SO_2) que também podem carbonatar o concreto (HELENE, 1993). Além disso, o concreto possui outros componentes alcalinos carbonatáveis, como por exemplo, o hidróxido de potássio (KOH), o hidróxido de sódio (NaOH) e os silicatos alcalinos (POSSAN, 2010).

Conclui-se que pelo menos nos primeiros meses o modelo europeu é aplicável, sendo que os valores obtidos apresentam pequenas discrepâncias em relação aos medidos *in loco*. Com exceção das vigas curadas os valores estimados do primeiro mês apresentaram maior profundidade de carbonatação, já no segundo mês apenas as vigas C25 e C15 curadas permaneceram no padrão do primeiro mês. As diferenças são oriundas da não homogeneidade do concreto, além dos desvios presentes nas equações. A Figura 17 ilustra a comparação dos K_{CO_2} .

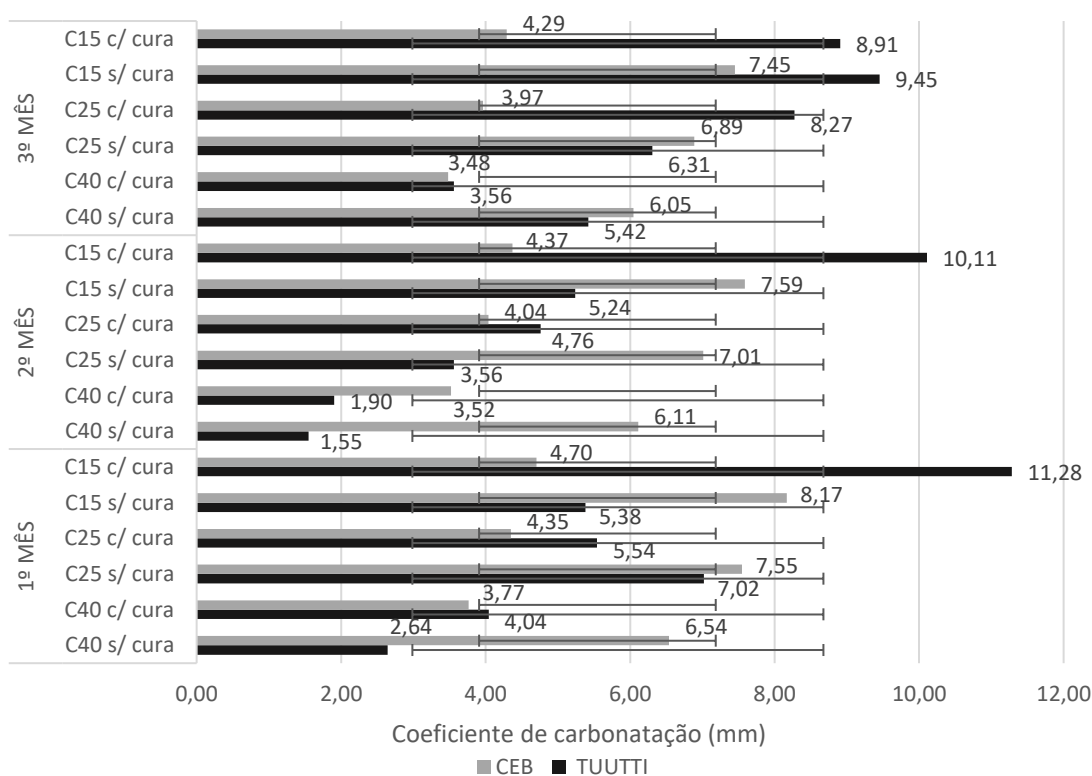


Figura 17 – Coeficientes de carbonatação estimados e reais
Fonte: Próprio autor (2019).

⁹ MEYER, A. Investigation on the carbonation of concrete. In: International Symposium on the Chemistry of Cement, 5. Tokyo, 1968. **Proceedings...** Tokyo, 1969, Part III, v. II/4, p.394-401. (Supplementary Papers).

É visível que no primeiro mês o tempo de cura é fundamental, porque pode interferir significativamente na profundidade de deterioração, sendo que ele ajudou a elevar o grau de hidratação dos concretos, reduzindo a difusividade do CO_2 por meio da redução dos diâmetros dos poros capilares. Nota-se que as diferenças entre os resultados de K_{CO_2} são maiores no segundo mês se compararmos ao primeiro. Segundo Ho & Lewis (1987), compactação e cura realizadas de forma inadequada produzem quantidade excessiva de poros, principalmente na superfície do concreto facilitando a difusão do CO_2 para seu interior, sendo estes, parâmetros que favorecem a velocidade de carbonatação (Figura 18).



Figura 18 – Efeitos do tempo de cura na carbonatação do concreto
Fonte: Próprio autor (2019).

De acordo com os valores reais e estimados dos coeficientes de carbonatação obtidos no terceiro mês e utilizando-se do modelo de Tuutti (1982), calcularam-se os tempos até a despassivação das armaduras das vigas, cujo cobrimento nominal deve ser de 30 mm conforme NBR 6118 (ABNT, 2014). Os valores dos tempos estão apresentados na Figura 19.

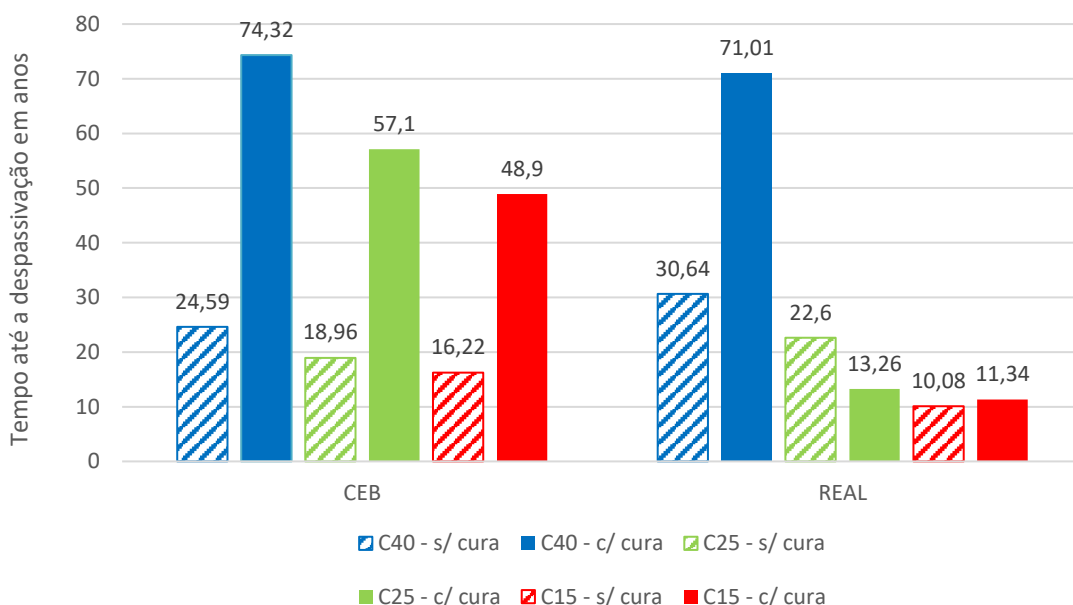


Figura 19 – Predição da vida útil de projeto
Fonte: Próprio autor (2019).

Observa-se que quanto menor a resistência característica do concreto, menor será o período de tempo decorrido até a despassivação do aço. Esse padrão foi mantido independente da realização da cura nos elementos estruturais.

Ao avaliar os resultados estimados pelo modelo europeu nota-se que as vigas produzidas com C25 e C40, que passaram pelo processo de cura de sete dias, atingiram o limite mínimo de vida útil de projeto (VUP) de 50 anos, estabelecido na NBR 6118 (ABNT, 2014). É perceptível também a importância do processo de cura na durabilidade das estruturas de concreto armado, pois nenhum dos concretos, tanto nos resultados do modelo europeu quanto nos resultados reais, atingiram o limite mínimo de VUP.

Com base nos resultados reais de predição de vida útil, é possível notar que apenas as vigas com cura produzidas com concreto C40 atingiriam o tempo mínimo de VUP. Entretanto, é provável que todos os concretos alcancem a VUP mínima, pois conforme já esclarecido, a velocidade de carbonatação desacelera em função do tempo. Para constatar essa hipótese, o cálculo do tempo até a despassivação deve ser realizado com valores de coeficiente obtidos nas vigas com idades mais avançadas.

3.5. Análises complementares

Além de todos os dados já analisados e supracitados foram observadas fissuras logo após a moldagem das vigas (Figura 20), resultantes do efeito da retração plástica, com maior incidência nos elementos sem cura. As fissuras se concentraram nas posições das armaduras, o que pode ser explicado por dois motivos: i) na região das armaduras a área é reduzida, resultando em um aumento da concentração de tensão de saída da água; ii) a película de água adsorvida sobre as barras aumenta a quantidade de água, resultando em uma maior pressão de saída.



Figura 20 – Ocorrência de fissuras
Fonte: Próprio Autor (2019).

De acordo com Vieira (2017), a retração plástica é a perda de água em seu estado fresco provocando a redução do volume do concreto, o que não resulta em grandes danos ao concreto. Em se tratando de durabilidade, essas fissuras podem representar redução considerável na vida útil de projeto dos elementos e ainda compromete a aparência da estrutura. Fissuras profundas ao contrário das superficiais podem prejudicar a estrutura ainda mais devido à possibilidade da infiltração da água.

4. Conclusões

Após a aplicação prática da pesquisa, além dos estudos de campo, foi possível concluir que o modelo europeu é de fato aplicável a nível nacional e pode ser utilizado como um modelo para prever a vida útil das estruturas.

Observou-se também, que o tempo de cura influencia significativamente na deterioração da estrutura, não só nos primeiros meses de idade como também por todo o período de vida útil, pois quanto maior o tempo de cura, menor foi a frente de carbonatação, em função do menor grau de hidratação.

Quanto maior a relação a/c, maior a frente de carbonatação observada, o que era esperado, no primeiro mês a velocidade é elevada, porque tem alta porosidade e permeabilidade em função da não hidratação completa dos grãos de cimento. A partir do segundo mês é normal essa velocidade cair, pois os grãos já estão hidratados, a porosidade é menor, a permeabilidade ao ar também é menor.

Notou-se que o consumo de cimento interfere de modo expressivo na frente de carbonatação, sendo ele fator predominante.

As vigas serão avaliadas com o passar dos anos para ver a partir de qual idade o modelo europeu não se aplica com a mesma precisão descrita anteriormente.

Referências

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A. Efeitos da ação do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: RIBEIRO, D. V. (Coord.) **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 51-73, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation C 192**: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken, Pensilvânia, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Versão Corrigida: 2016 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7480:** Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 14931:** Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 67:** - Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro, 1998.

CAMPOS NETO, T. F. **Efeitos da Temperatura do Concreto Fresco na sua Trabalhabilidade.** 2015, 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

CAMPOS NETO, T. F.; OLIVEIRA, A. L. A.; SABINO, M. A.; SÁNCHEZ, J. M. M.; ZANONI, V. A. G. **Predição de vida útil: Métodos de avaliação fundamentados na carbonatação do concreto.** Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Brasília, 16f. 2018.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993, 231f. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** 4. ed. São Paulo: PINI, 1999. 47p.

HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v. 17, p.489-504, 1987.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Dados Meteorológicos. [s. l.], 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em: 27 maio 2019.

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

_____. **Fib Bulletin 55: Model Code 2010, First complete draft – Volume 1.**

LIMA, M. G. Ações do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**, vol. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

MONTEMOR, M. F.; CUNHA, M. P.; FERREIRA, M. G.; SIMÕES, A. M. Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. **Cement & Concrete Composites**, v.24, p.45-53, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997, 828p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 146p.

POSSAN, E. **Modelagem da Carbonatação e Precisão de Vida Útil de Estruturas de Concreto em Ambiente Urbano**. 2010. 263f. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

POWERS, T. C. **Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste**. Journal of the american ceramic society vol. 41, P. 1 (1958).

RIBEIRO, D. V. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In: RIBEIRO, D. V. (Coord.) **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 75-85, 2014.

RIBEIRO, D.V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, D.V. (Coord.) **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 87-118, 2014.



TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. 469p.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, T. L. **Fissuras em concreto: Estudos de caso em Florianópolis**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

As tabelas abaixo apresentam os resultados completos obtidos por meio de ensaios em campo de carbonatação e aplicação dos valores estimados pela normativa europeia CEB Bulletin 55 (2010).

Tabela A.1 – Resultados estimados e reais com um mês de exposição

1º mês	C15 s/cura		C15 c/ cura		C25 s/cura		C25 c/ cura		C40 s/cura		C40 c/ cura	
	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real
K_e	0,57132	-	0,57132	-	0,57132	-	0,57132	-	0,57435	-	0,57435	-
K_c	3,01419	-	1,0	-	3,01419	-	1,0	-	3,01419	-	1,0	-
C_s	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-
W (t)	0,99277	-	0,99277	-	0,99277	-	0,99277	-	0,99631	-	0,99631	-
R_c	1,5449E-09	-	1,5449E-09	-	1,3194E-09	-	1,3194E-09	-	1,0116E-09	-	1,0116E-09	-
X_c (t)	2,30	1,55	1,33	3,26	2,13	2,03	1,23	1,60	1,84	0,76	1,06	1,17
K_{coz}	8,17	5,38	4,71	11,28	7,55	7,02	4,35	5,54	6,54	2,64	3,77	4,04

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela A.2 – Resultados estimados e reais com dois meses de exposição

2º mês	C15 s/cura		C15 c/ cura		C25 s/cura		C25 c/ cura		C40 s/cura		C40 c/ cura	
	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real
K_e	0,62	-	0,62	-	0,62	-	0,62	-	0,62	-	0,62	-
K_c	3,01419	-	1,0	-	3,01419	-	1,0	-	3,01419	-	1,0	-
C_s	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-
W (t)	1,0	-	1,0	-	1,0	-	1,0	-	1,0	-	1,0	-
R_c	1,5449E-09	-	1,5449E-09	-	1,3194E-09	-	1,3194E-09	-	1,0116E-09	-	1,0116E-09	-
X_c (t)	3,05	2,14	1,76	4,13	2,82	1,45	1,62	1,94	2,46	0,63	1,42	0,78
K_{CO2}	7,59	5,24	4,37	10,11	7,01	3,56	4,04	4,76	6,11	1,56	3,52	1,9

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela A.3 – Resultados estimados e reais com três meses de exposição

3º mês	C15 s/cura		C15 c/ cura		C25 s/cura		C25 c/ cura		C40 s/cura		C40 c/ cura	
	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real	CEB	Real
K_e	0,65268	-	0,65268	-	0,65268	-	0,65268	-	0,65451	-	0,65451	-
K_c	3,01419	-	1,0	-	3,01419	-	1,0	-	3,01419	-	1,0	-
C_s	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-	0,039	-
W (t)	0,86182	-	0,86182	-	0,86182	-	0,86182	-	0,86305	-	0,86305	-
R_c	1,5449E-09	-	1,5449E-09	-	1,3194E-09	-	1,3194E-09	-	1,0116E-09	-	1,0116E-09	-
X_c (t)	3,7	4,73	2,13	4,45	3,42	3,15	1,97	4,14	2,99	2,71	1,72	1,78
K_{co2}	7,45	9,45	4,29	8,91	6,89	6,31	3,97	8,27	6,05	5,42	3,48	3,56

Fonte: Próprio autor (2019).