



EFEITO DO METACAULIM NA CARBONATAÇÃO NATURAL: AVALIAÇÃO COM MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

Réus, Giovana Costa (1); Ditzel, Luiz Felipe S. (2); Medeiros, Marcelo H. F. (3)

UFPR, gio_reus@yahoo.com.br; UFPR, felipesimioni@hotmail.com; UFPR, medeiros.ufpr@gmail.com

RESUMO

Na construção civil são encontradas com frequência diversas manifestações patológicas em edificações. Com base em estudos que tem sido desenvolvidos ao longo do tempo, vem se demonstrando que duas das principais causas da degradação de estruturas de concreto são a carbonatação e a penetração de cloretos. Neste contexto, este trabalho trata do processo de carbonatação natural do concreto, investigando a influência da adição de metacaulim e tentando repor a reserva alcalina do concreto com adição de cal na sua dosagem. Para isso, foram estudados três proporcionamentos de concreto com relações cimento:agregados distintas, tais como: 1:4; 1:5; 1:6. Para caracterização destes concretos foram executados os ensaios de determinação da resistência à compressão e absorção de água por capilaridade. Os corpos de prova ficaram exposto ao ambiente de laboratório até 77 meses, sendo efetivadas leituras de profundidade de carbonatação aos 20, 32 40 e 77 meses. Os resultados indicaram ter uma forte relação entre a absorção de água e a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Também indicaram que os 5% de cal adicionados na massa de concreto não foram suficientes para compensar o consumo de portlandita provocado pelas reações pozolânica do metacaulim.

Palavras-chave: Carbonatação. Concreto armado. Modelo. Previsão. Vida útil.

ABSTRACT

In civil construction, several pathological manifestations are frequently found in buildings. Based on studies that have been developed over time, it is noted that the primarily causes of the deterioration of reinforced concrete structures are carbonation and chloride penetration. In this context, this study deals with the concrete carbonation process under natural conditions by investigating the effect of metakaolin addition and the replacement of alkaline reserve by adding cal in its dosage. For comparison, three concrete proportions were studied with the relationship between cement and aggregate such as 1:4, 1:5, 1:6. These concretes were characterized by implementing the tests for determining compressive strength and capillary water absorption. The samples were exposed in the laboratory environment until the 77 months and the measurements of carbonation depth were effective at 20, 32, 40 and 77 months. The results confirm a strong relationship between the water absorption and the rate of carbonation front advance. The 5% of lime added to the concrete mix, however, was not enough to compensate the consumption of portlandite caused by pozzolanic reaction of metakaolin.

Keywords: Carbonation, reinforced concrete, model, service life, estimate.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado estão em constante interação com o meio a qual estão inseridas. Estruturas expostas a ambientes mais agressivos, tem maior propensão de apresentar manifestações patológicas.

A corrosão de armaduras é um dos problemas de maior ocorrência em estruturas de concreto armado, sendo que a ação dos íons cloreto e a carbonatação são os principais causadores do início deste mecanismo de degradação.

O presente estudo tem como objetivo avaliar o avanço da frente de carbonatação, de forma natural, para concretos com e sem adição de metacaulim e cal, bem como verificar a aplicação de diferentes modelos de previsão de vida útil para essas amostras.

2 O processo de carbonatação

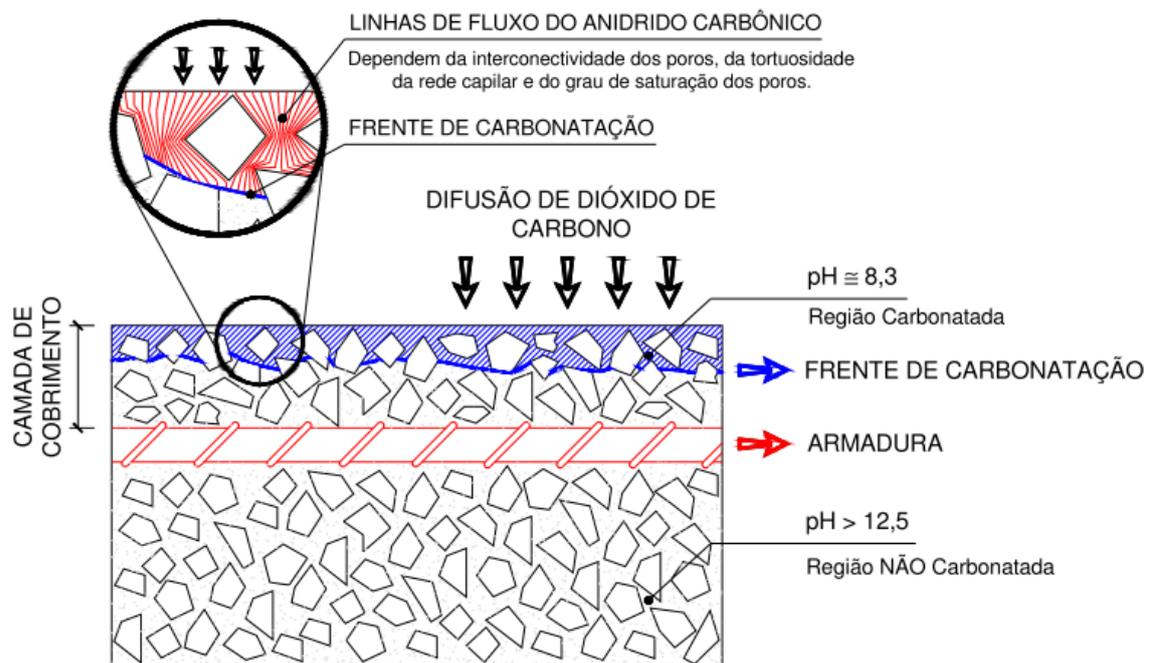
O concreto é um material que possui elevada alcalinidade, fato que confere proteção das armaduras frente a corrosão (GOÑI; ANDRADE, 1990). Isso ocorre por meio da formação de uma película fina de óxidos de ferro, denominada película de passivação. Portanto o aço está protegido da corrosão enquanto a película de passivação estiver íntegra (HELENE, 1993).

A carbonatação é um dos principais agentes iniciadores da corrosão das armaduras, especialmente em ambientes urbanos, em função da alta concentração de dióxido de carbono (CO_2) no ambiente.

A carbonatação é a reação entre o dióxido de carbono, presente na atmosfera, e produtos alcalinos [em especial o $\text{Ca}(\text{OH})_2$], presentes nos poros do concreto, formando o carbonato de cálcio (CaCO_3).

As reações de carbonatação ocorrem da face externa em direção ao interior do concreto. Isso ocorre pois a carbonatação é governada pela difusão do CO_2 no interior dos poros do concreto. De acordo com Helene (1993) e Hoppe Filho (2008), a região que divide a área carbonatada da área não carbonatada é denominada de frente de carbonatação, assim como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática do mecanismo de carbonatação.



2.1 Carbonatação natural e modelos de previsão de vida útil

O processo de carbonatação natural (0,03% a 1% de CO_2) pode levar vários anos para apresentar resultados a serem analisados (POSSAN, 2007). A fim de reduzir o tempo de carbonatação, muitos trabalhos científicos utilizam a carbonatação acelerada. A carbonatação acelerada permite um controle bastante rígido dos parâmetros envolvidos no processo de carbonatação (teor de CO_2 , umidade relativa e temperatura). Este controle pode ser um benefício às pesquisas no sentido de haver menos variáveis regendo o processo de

carbonatação, porém essa situação na qual todos os parâmetros controlados, não ocorre em situações reais de degradação (PAULETTI *et. al.*, 2007).

Um dos primeiros modelos matemáticos desenvolvidos para prever o avanço da frente de carbonatação é o modelo de Tutti (1982), representado na Equação 1. Para aplicar esse modelo, supõe-se que o coeficiente de difusão efetivo de CO₂ é igual ao do O₂ por ser mais fácil a sua determinação em laboratório, embora deva-se destacar que não existe equivalência perfeita entre os dois gases (CARMONA, 2005).

$$X_{CO_2} = k_{CO_2} \times \sqrt{t} \quad (1)$$

Onde,

X_{CO_2} é a espessura da profundidade carbonatada (mm);

k_{CO_2} é o coeficiente de carbonatação (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$);

t é a idade em anos.

O modelo matemático desenvolvido por Possan (2010), representado pela Equação 2, tem o objetivo de estimar a profundidade de carbonatação e a previsão da vida útil de projeto de estruturas de concreto, envolvendo variáveis de entrada de fácil obtenção como a resistência do concreto, o tipo de cimento utilizado, a umidade relativa média do ambiente onde a estrutura se encontra, entre outros.

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

Onde,

y = profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;

f_c = resistência característica à compressão axial do concreto, em MPa;

k_c = fator variável referente ao tipo de cimento empregado (Tabela 1);

k_{fc} = fator variável referente a resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 1);

t = idade do concreto, em anos;

ad = teor de adição pozolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;

k_{ad} = fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 1);

UR = umidade relativa média, em % x 0,01;

k_{ur} = fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 1);

CO_2 = teor de CO₂ da atmosfera, em %.

k_{CO_2} = fator variável referente ao teor de CO₂ do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado (Tabela 1);

k_{ce} = fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura (Tabela 2).

Para a obtenção dos fatores variáveis, faz-se necessário o uso da Tabela 1 e da Tabela 2.

Tabela 1 – Coeficientes do modelo em função das características do concreto e das condições ambientais.

Tipos de cimento	Características do concreto			Condições ambientais	
	Cimento k_c	f_c k_{fc}	Adição k_{ad}	CO ₂ k_{CO2}	UR k_{UR}
CP 1	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 em função das condições de exposição.

Condições de exposição da estrutura	
Proteção à chuva	k_{ce}
Ambiente interno protegido da chuva	1,30
Ambiente externo protegido da chuva	1,00
Ambiente externo desprotegido da chuva	0,65

Fonte: Possan. (2010)

Já o modelo de JCI (HAN et al., 2013) estima a espessura da camada carbonatada analisando apenas o tempo de exposição da estrutura e a relação a/c utilizada, conforme a Equação 3.

$$D = \left(-0,357 + 0,9 * \frac{a}{c} \right) * \sqrt{t} \quad (3)$$

Onde:

D = Espessura da profundidade carbonatada (cm);

a/c = relação água/cimento;

t = idade, em anos.

3 METODOLOGIA

Foram moldadas amostras de concreto de dimensão 10 x 20 cm. Determinou-se o teor ideal de argamassa e com base nesse teor, foram moldados três traços diferentes, 1:4, 1:5 e 1:6 (traço rico, médio e pobre, respectivamente). Além da variação dos traços, houve também uma composição de aglomerantes (metacaulim e cal). O metacaulim foi usado substituindo 8% da massa do cimento, enquanto a cal foi adicionada em 5%. As amostras de referência contém apenas o cimento do tipo CP V – ARI. A análise química e física desse cimento

é apresentada na Tabela 3. A Tabela 4 mostra a proporção da mistura dos aglomerantes e o traço do concreto utilizado.

Tabela 3 – Características físico-químicas do cimento Portland CP V – ARI

Análise química									
CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaO livre (%)	Perda Fogo (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente Alcalino (%)
59,72	18,34	4,12	2,52	5,35	3,05	1,49	3,20	0,63	0,62
Análise física									
Expansão Quente (mm)	Início Pega (h)	Fim Pega (h)	Consistência Normal (%)	Blaine (cm ² /g)	# 200 (%)	# 325 (%)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	
0,50	02:15	03:00	27,6	4.370	0,10	2,80	42,70	51,10	

Fonte: Ferreira *et al.* (2013)

Tabela 4 - Proporcionamento dos concretos

Amostra	Aglomerantes			Agregados			Relação a/c	Slump
	Cimento Portland	Metacaulim	Cal	Areia	Brita 1	Brita 0		
1:4 – REF	1,0	-	-	1,65	1,18	1,18	0,46	8,0
1:5 – REF	1,0	-	-	2,18	1,41	1,41	0,61	7,5
1:6 – REF	1,0	-	-	2,71	1,65	1,65	0,66	7,0
1:4 – MET	0,92	0,08	-	1,65	1,18	1,18	0,56	8,0
1:5 – MET	0,92	0,08	-	2,18	1,41	1,41	0,66	7,0
1:6 – MET	0,92	0,08	-	2,71	1,65	1,65	0,75	8,5
1:4 – CAL	0,92	0,08	0,05	1,65	1,18	1,18	0,56	8,5
1:5 – CAL	0,92	0,08	0,05	2,18	1,41	1,41	0,65	8,5
1:6 – CAL	0,92	0,08	0,05	2,71	1,65	1,65	0,74	8,5

Fonte: Ferreira *et al.* (2013b)

A relação água/cimento foi ajustada até que se obtivesse um abatimento do tronco de cone de 80±10 mm, a fim de padronizar a consistência das amostras.

O metacaulim utilizado possui massa específica de 2,56 kg/dm³, 0,1% de óxido de magnésio, e atividade pozolânica com o cimento (aos 7 dias) de 115%. Os agregados graúdos utilizados foram brita 0 e brita 1, seguindo a proporção de 1:1.

A cura das amostras foi realizada por 28 dias em câmara úmida com 23±2 °C e 100% de umidade relativa. Após o período de cura, as amostras foram armazenada em sala com temperatura e umidade variáveis e teor de CO₂ de aproximadamente 0,053%, para a ocorrência da carbonatação natural.

Aos 28 dias de cura, o ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007).

Ao decorrer do processo de carbonatação natural, foram realizadas medições de profundidade de carbonatação nas idades de 20, 32, 40 e 77 meses. A medição da profundidade de carbonatação foi realizada por meio do método colorimétrico. Este método consiste em aspergir solução alcoólica de fenolftaleína na superfície recém fraturada da amostra. A região alcalina apresenta a coloração vermelho carmin, enquanto a região de pH reduzido (carbonatada) não apresenta coloração, como é possível observar na Figura 2.

Figura 2 - Amostras após aspensão da solução de fenolftaleína.



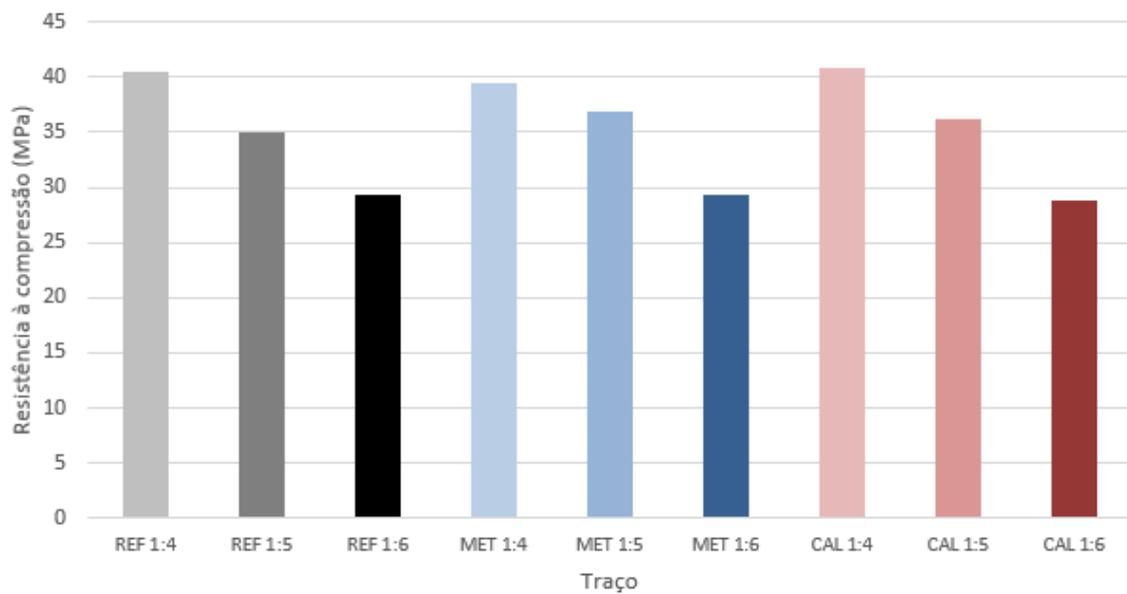
Fonte: Autores (2017)

4 RESULTADOS

4.1 Avanço da carbonatação natural

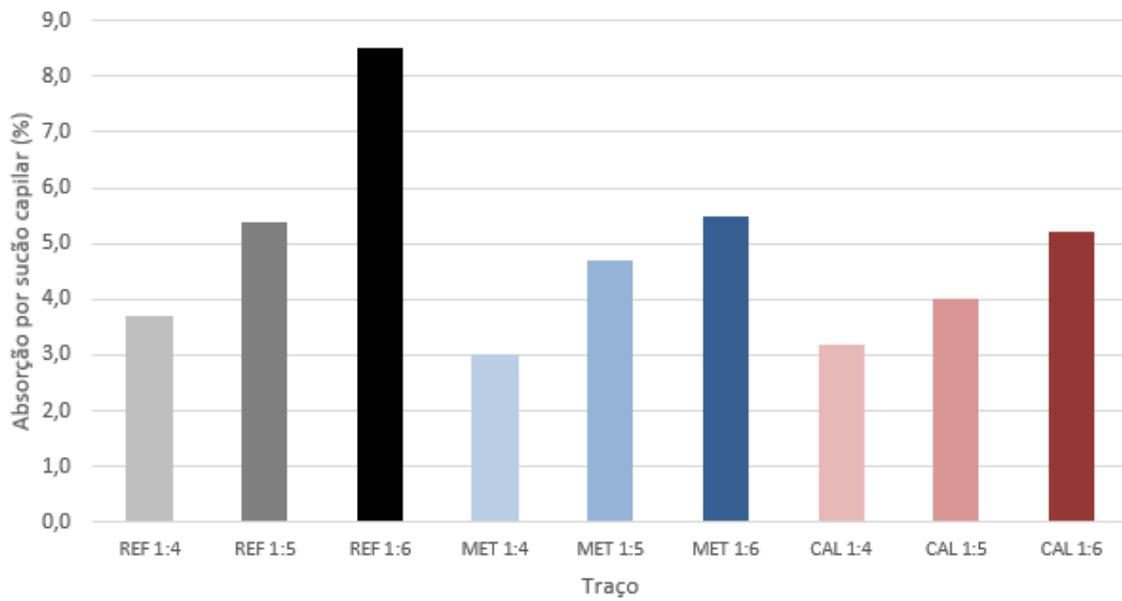
Os resultados de resistência à compressão e absorção capilar são apresentados nas Figura 3 e Figura 4.

Figura 3 – Resistência à compressão.



Fonte: Autores (2017)

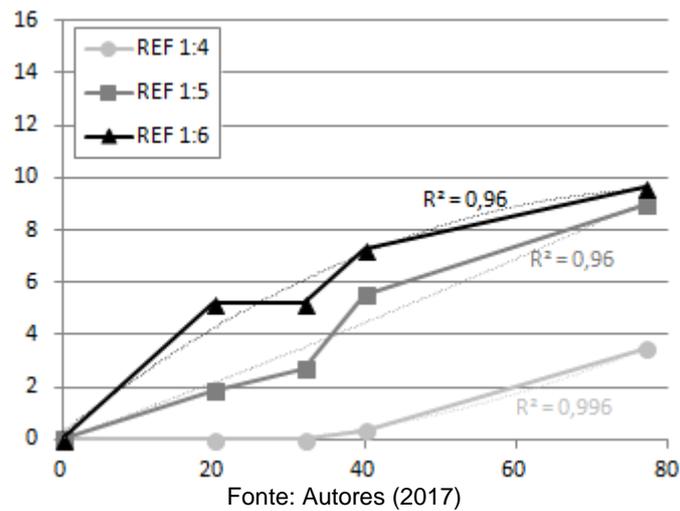
Figura 4 – Absorção de água por sucção capilar.



Fonte: Autores (2017)

As Figura 5, Figura 6 e Figura 7 apresentam os resultados de profundidade de carbonatação para as amostras de referência, com metacaulim e com metacaulim e cal, respectivamente.

Figura 5 – Profundidade de carbonatação das amostras de referência.



Fonte: Autores (2017)

Figura 6 - Profundidade de carbonatação das amostras com substituição de parte do cimento por metacaulim.

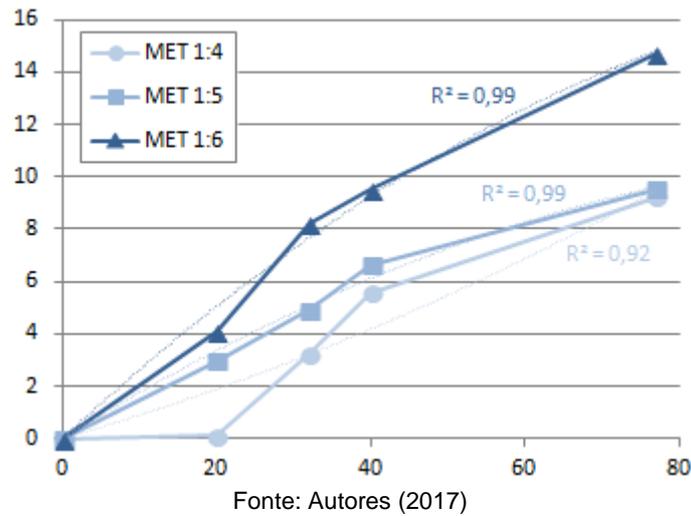
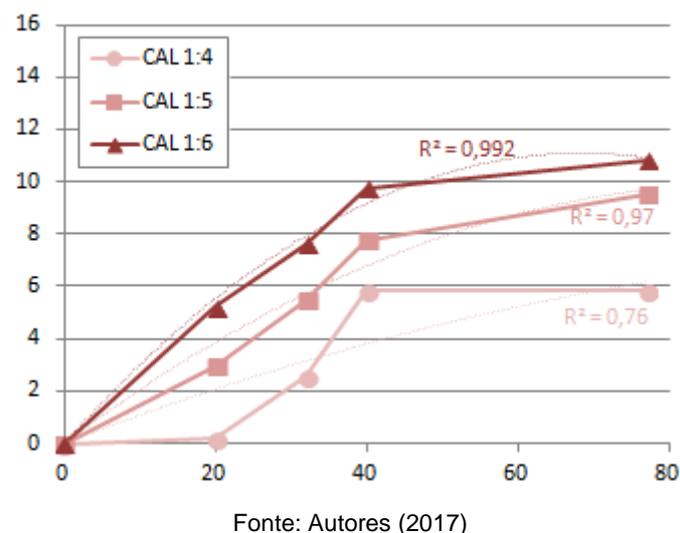


Figura 7 - Profundidade de carbonatação das amostras com substituição de parte do cimento por metacaulim e adição de cal.



É possível observar que as amostras com o traço pobre (1:6) obtiveram as maiores profundidades de carbonatação, seguidas pelas amostras com o traço médio (1:5) e traço rico (1:4). Isso ocorreu tanto para as amostras de referência, como para as amostras com metacaulim e com metacaulim e cal. Isso pode ter ocorrido porque os traços com menor quantidade de cimento apresentaram maiores valores de absorção de água por capilaridade, o que pode ter facilitado o ingresso do CO₂ para o interior dos poros do concreto.

Comparando-se os traços de mesma relação cimento: agregado (Figuras 8, 9 e 10), com diferentes adições (referência, metacaulim e metacaulim mais cal), observou-se que o traço de referência apresentou menores profundidade de carbonatação em todos os casos. Isso ocorre em função da amostra de referência possuir maior reserva alcalina, visto que o metacaulim consome o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, assim como comprovado no estudo de Medeiros et al. (2017). Os traços de metacaulim e cal apresentaram resultados

intermediários entre o traço de Referência e o com 8% de metacaulim, o que indica que a porcentagem de 5% de cal utilizada, não foi suficiente para compensar por completo a diminuição da reserva alcalina causada pelo metacaulim.

Figura 8 - Profundidade de carbonatação das amostras com traço rico (1:4).

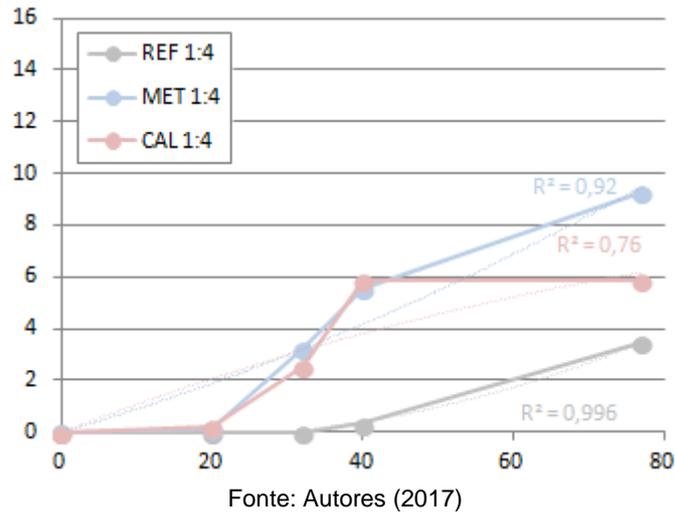


Figura 9 - Profundidade de carbonatação das amostras com traço médio (1:5).

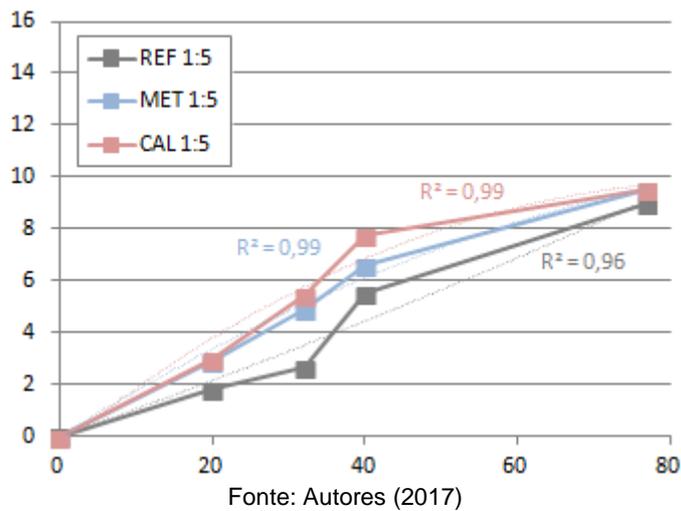
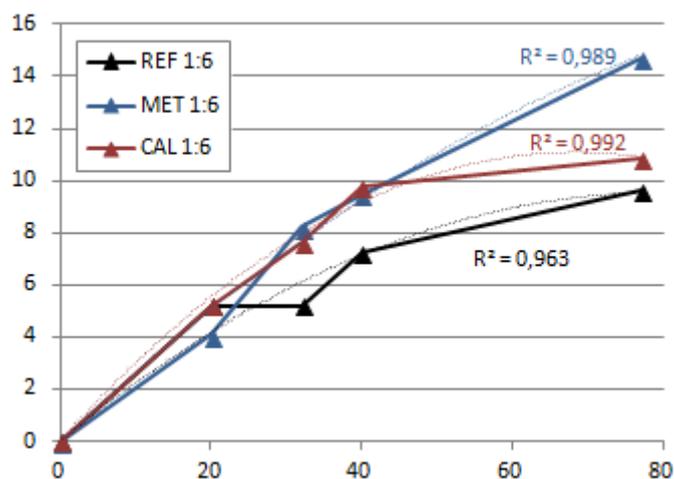


Figura 10 - Profundidade de carbonatação das amostras com traço pobre (1:6).



Fonte: Autores (2017)

4.2 Previsão do avanço da frente de carbonatação

De acordo com os modelos de previsão de vida útil apresentados anteriormente (Equações 1, 2 e 3), estimou-se a vida útil das amostras estudadas para um período de 100 meses, como é possível observar na Tabela 5.

Tabela 5 – Estimativa da espessura de cobertura para vida útil para 50 anos das amostras estudadas.

Amostra	Espessura carbonatada (mm)		
	Tutti, 1982	Possan, 2010	JCI, 2013
REF 1:4	9,73	7,93	25,70
REF 1:5	25,03	10,00	35,25
REF 1:6	26,81	13,27	38,43
MET 1:4	25,78	8,84	32,07
MET 1:5	26,64	9,91	38,43
MET 1:6	41,06	14,35	44,16
CAL 1:4	11,69	8,39	32,07
CAL 1:5	26,62	10,18	37,80
CAL 1:6	30,25	14,76	43,52

Fonte: Autores (2017)

Com os cálculo de previsão de vida útil para 50 anos, com os três modelos adotados, é possível observar que o modelo de JCI (HAN et al., 2013) mostrou-se o modelo mais conservador, visto que esse modelo apresentou os maiores resultados de profundidade de carbonatação. Enquanto o modelo de Possan (2010) apresentou os menores resultados.

Observa-se que os modelos de Tutti (1982) e JCI (HAN et al., 2013) são modelos mais simplificados do que o modelos de Possan (2010), pois levam em consideração poucos parâmetros para o cálculo de previsão de profundidade de carbonatação.

Após a verificação da previsão de espessura de carbonatação em idades futuras, calculou-se o espeussuras carbonatadas por meio dos três modelos matemáticos e comparou-se esses valores de previsão, com a medida

efetivamente obtida. A Tabela 6, a Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 6 – Comparação da espessura de carbonatação calculada por modelos matemáticos e valores medidos, para 32 meses de carbonatação natural.

Amostra	32 meses			
	Medido	Tutti, 1982	Possan, 2010	JCI, 2013
REF 1:4	0,00	2,25	1,83	3,19
REF 1:5	2,67	5,78	2,31	5,40
REF 1:6	4,40	6,20	3,07	6,14
MET 1:4	3,23	5,96	2,04	4,67
MET 1:5	4,91	6,16	2,29	6,14
MET 1:6	8,22	9,49	3,32	7,46
CAL 1:4	2,53	2,70	1,94	4,67
CAL 1:5	5,46	6,15	2,35	5,99
CAL 1:6	7,61	6,99	3,41	7,31

Fonte: Autores (2017)

Tabela 7 – Comparação da espessura de carbonatação calculada por modelos matemáticos e valores medidos, para 40 meses de carbonatação natural.

Amostra	40 meses			
	Medido	Tutti, 1982	Possan, 2010	JCI, 2013
REF 1:4	0,34	0,34	2,05	3,98
REF 1:5	5,52	2,58	2,58	6,45
REF 1:6	7,24	7,35	3,42	7,27
MET 1:4	5,55	0,15	2,28	5,63
MET 1:5	6,62	4,15	2,56	7,27
MET 1:6	9,49	5,76	3,70	8,75
CAL 1:4	5,85	0,29	2,16	5,63
CAL 1:5	7,77	4,19	2,63	7,11
CAL 1:6	9,76	7,36	3,81	8,58

Fonte: Autores (2017)

Tabela 8 – Comparação da espessura de carbonatação calculada por modelos matemáticos e valores medidos, para 77 meses de carbonatação natural.

Amostra	Medido	77 meses		
		Tutti, 1982	Possan, 2010	JCI, 2013
REF 1:4	3,49	0,47	2,84	6,92
REF 1:5	8,97	3,59	3,58	10,34
REF 1:6	9,61	10,21	4,75	11,48
MET 1:4	9,23	0,21	3,17	9,20
MET 1:5	9,54	5,77	3,55	11,48
MET 1:6	14,71	7,99	5,14	13,53
CAL 1:4	4,19	0,41	3,01	9,20
CAL 1:5	9,54	5,82	3,65	11,25
CAL 1:6	10,84	10,21	5,29	13,30

Fonte: Autores (2017)

De acordo com os valores obtidos, pode-se observar que o modelo JCI (HAN et al., 2013) foi o modelo que se aproximou mais vezes dos valores de carbonatação medidos (59% das vezes), porém isso não é uma constante. Em alguns casos, outros modelos se assemelharam mais a realidade. Portanto, não é possível assegurar que há um modelo que representa melhor a realidade entre estes três modelos estudados. Isso pode ocorrer devido a variabilidade do processo de carbonatação natural, visto que vários fatores diferentes influenciam no processo de avanço da frente de carbonatação.

5 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho experimental, foi possível estabelecer as conclusões apresentadas a seguir:

- A absorção por sucção capilar possui influência direta no avanço da frente de carbonatação;
- As amostras de referência (sem adição de metacaulim) apresentaram menores profundidade de carbonatação;
- A adição de 5% de cal na dosagem do cimento reduziu o efeito de aumento da carbonatação causado pelo uso de 8% de metacaulim em substituição parcial do cimento Portland, porém, não foi suficiente para compensar completamente o efeito de aceleração da carbonatação resultado da adição de metacaulim;
- Não é possível assegurar que há um modelo de previsão de vida útil que represente melhor a realidade, entre os modelos estudados.
- No estudo realizado por POSSAN, 2013 (p. 181) foi realizada a mesma comparação com idades de 7, 10 e 12 anos, com valores que ficaram observados bem próximos dos medidos utilizando o método proposto no trabalho.;
- Em trabalhos futuros, recomenda-se comparar um número maior de modelos para verificar quais se assemelham da realidade observada;
- Recomenda-se um mesmo estudo envolvendo amostras com diferentes adições minerais e diferentes tipos de cimento.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LAME-DCC-UFPR), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC-UFPR), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Também agradecemos ao técnico de laboratório Ricardo Volert pelo apoio na realização dos ensaios no laboratório.

REFERÊNCIAS

GOÑI, S.; ANDRADE, C. Synthetic concrete pore solution chemistry and rebar. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. c, p. 525–539, 1990.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 248 p. Tese (Tese) — Universidade de São Paulo, 1993.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 247 p. Tese (Tese) — Universidade de São Paulo, 2008.

HAN, et al., **Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures**. **Journal Construction and Building Materials**. 2013

PAULETTI, C.; POSSAM, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, p. 7-20. 2007

TUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. 469 p. Swedish. **Cement and Concrete Research**. N. 504. Estocolmo, 1982.

CARMONA, T. G. **Modelagem de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 103 p. Dissertação (Dissertação) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 2005.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 265 p. Tese (Tese) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

FERREIRA, A.; MEDEIROS, M. H.F.; PEREIRA, E.; KLEIN, N. S. Estimativa do avanço da frente de carbonatação em concreto: efeito do metacaulim. Simpósio sobre materiais e construção civil. Toledo, 2013.

FERREIRA, A.; FRÉZ, J. C. MEDEIROS, M. H.F.; Reposição de reserva alcalina de concreto com adição pozolânica usando cal hidratada: Um estudo sobre carbonatação natural. 55º Congresso Brasileiro do Concreto. Gramado, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção, reserva alcalina e relação a/c. **Ambiente Construído (Online)**, 2017.