

## Avaliação da durabilidade do concreto autoadensável com diferentes teores de filer calcário em substituição ao cimento Portland

Luiza Rodrigues Meira de Miranda<sup>(1)</sup>, Fabrício Gonzales de Resende<sup>(2)</sup>  
e Valdirene Maria Silva Capuzzo<sup>(1)(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasil

<sup>(2)</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasil.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6242>

### RESUMO

Para que um concreto possa receber a denominação de autoadensável é necessário que ele possua, simultaneamente, fluidez, habilidade passante e coesão. Além das características de autoadensabilidade, é imprescindível o estudo da durabilidade desses concretos. Sabe-se que um dos principais mecanismos de despassivação da armadura do concreto estrutural é a carbonatação, que está diretamente ligada à facilidade que o CO<sub>2</sub> tem para difundir-se no interior do concreto, às condições ambientais e às propriedades de permeabilidade. Foram realizados três traços de concreto autoadensável, sendo o referencial com 0% de filer calcário e outros dois traços com 20% e 40% de filer calcário em substituição ao cimento Portland. As propriedades mecânicas avaliadas foram resistência à compressão simples axial e resistência à tração por compressão diametral. Para avaliar a durabilidade do CAA foi realizado o ensaio de carbonatação acelerada segundo as recomendações da ISO 1920-12:2015. Houve uma diminuição nas propriedades mecânicas do concreto autoadensável com o aumento do teor de filer calcário, sendo a redução mais expressiva para CAA40, o que o torna um material inadequado para questões de durabilidade da classe ambiental considerada. A profundidade de carbonatação aumentou com o aumento do teor de filer calcário, devido à redução do consumo de cimento Portland.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto autoadensável, carbonatação, propriedades mecânicas, durabilidade.

### 1.- INTRODUÇÃO

O CAA aparece como uma evolução no âmbito dos concretos especiais e tem como principal característica sua capacidade de autoadensabilidade, ou seja, é capaz de se mover no interior das fôrmas, passando por qualquer espaço entre as armaduras devido apenas ao seu peso próprio, sem necessidade de nenhuma intervenção externa. Essa fluidez aparece atrelada a uma grande coesão da mistura, o que resulta em peças mais homogêneas e com

um tempo de vida útil maior [1]. Quando comparado ao concreto convencional, o CAA exige um maior cuidado na sua dosagem e produção, sendo necessário um controle rígido na escolha dos materiais e na sua variabilidade durante o processo. É importante inclusão de um alto teor de finos e/ou a utilização de aditivos químicos, que deixam a mistura mais estável e conseqüentemente menos suscetível à segregação durante todo o processo de transporte e lançamento nas fôrmas [2][3][4].

A durabilidade de uma estrutura de concreto está intimamente associada à permeabilidade da camada superficial, que deve limitar a entrada de substâncias que podem iniciar ou propagar possíveis ações deletérias (Dióxido de carbono - CO<sub>2</sub>, cloreto, sulfato, água, oxigênio, álcalis, ácidos etc.) [3]. Calado et al. (2015) [5] compararam dois tipos de concreto, um convencional (CC) e um CAA, com relações a/c de 0,4 e 0,45, e os resultados obtidos mostraram que o CAA apresenta uma resistividade elétrica média 11,4% maior que o CC; uma difusão de íons cloreto 36,7% menor da encontrada no CC; uma penetração média da carbonatação acelerada 45,8% melhor que o CC e a porosidade aberta média 55,6% menor que o CC, concluindo que, geralmente, o CAA possui melhores indicadores de durabilidade do que o concreto convencional. Um dos fatores que contribuíram para a popularidade das estruturas de concreto armado é que o concreto fornece uma barreira de proteção para o aço, protegendo-o de agressões externas, além de garantir o meio alcalino necessário para que a armadura tenha sua proteção química. A corrosão das armaduras aparece como a principal causa de danos nas estruturas de concreto armado, podendo ser provocada, quando em condições favoráveis, pela penetração de íons cloreto e/ou a carbonatação do concreto [6][7].

O processo de carbonatação, que ocorre pela reação entre o CO<sub>2</sub> da atmosfera e compostos hidratados do cimento, está diretamente ligado à facilidade que o dióxido de carbono tem para difundir-se no interior do concreto, às condições ambientais e às propriedades de permeabilidade do concreto. Há uma redução da alcalinidade que altera as condições de estabilidade química da camada de passivação da armadura, pela redução do hidróxido de cálcio na solução de poros, deixando-a suscetível ao início do processo corrosivo [8][9][10].

Em condições naturais de exposição (0,03 a 1% de CO<sub>2</sub>), o avanço da frente de carbonatação leva vários anos para apresentar resultados passíveis de análise. Por isso, muitas pesquisas são desenvolvidas utilizando um sistema de teste acelerado, que submete o concreto a teores elevados de CO<sub>2</sub> e permite um controle rígido de todas as condições de exposição, fornecendo uma reposta rápida do comportamento do material ante a carbonatação [8][11]. Existe, ainda, uma grande dificuldade, no meio técnico, de comparar os resultados de pesquisas sobre carbonatação acelerada devido à grande variabilidade dos mesmos em função da ausência de padronização nos ensaios. Tem-se agora a ISO 1920-12:2015 [12] a qual será bastante relevante aos estudos futuros sobre carbonatação acelerada. Espera-se com esta nova norma uma melhoria na qualidade das pesquisas sobre o tema.

O objetivo desse trabalho é avaliar a durabilidade do CAA com diferentes teores de substituição de cimento Portland por filer calcário, utilizando ensaios de propriedades

mecânicas e de carbonatação acelerada, de acordo com as recomendações da ISO 1920-12:2015.

## 2.- MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Dosagem do CAA

Os materiais escolhidos para o desenvolvimento dessa pesquisa são todos provenientes da região de Brasília-DF e não passaram por nenhum tratamento ou beneficiamento prévio. O cimento escolhido foi o cimento Portland composto com filer, CP II – F 40. Como agregado miúdo optou-se por uma composição de duas areias, uma areia rosa (quartzosa), cujo módulo de finura é igual a 1,09 e diâmetro máximo de 0,6 mm, e uma areia britada (calcária), cujo módulo de finura é igual a 2,91 e diâmetro máximo de 4,75 mm. Também foi realizada uma composição de pedras britadas para utilização como agregado graúdo, essas de origem calcária e com diâmetros máximos característicos de 12,5 e 19 mm. Foi utilizado um aditivo superplastificante de terceira geração, de base policarboxilato. Por fim, têm-se o filer calcário, de massa específica 2,70 g/cm<sup>3</sup>, como adição mineral, uma vez que o CAA exige uma maior incorporação de finos para estabilidade da mistura. As curvas granulométricas do cimento e do filer calcário estão apresentadas na Figura 1.

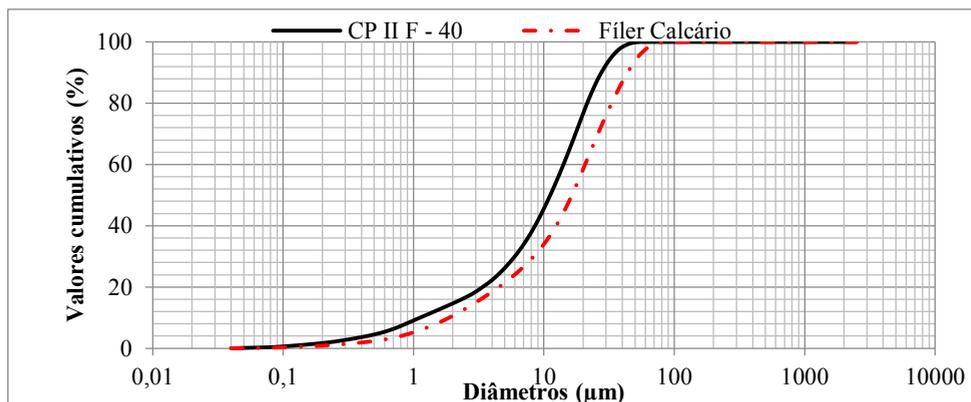


Figura 1 - Curvas granulométricas do cimento Portland e do filer calcário

A dosagem do CAA foi realizada utilizando o conceito da composição do esqueleto granular através do ensaio de massa unitária no estado compactado e os critérios do ACI 237R-07. A relação água/aglomerante (a/agl) fixa igual a 0,55, corresponde à classe de agressividade III da NBR 6118:2014 [13] e foi escolhida por representar um dos cenários de maior vulnerabilidade do material. Optou-se por fixar o consumo de aglomerante de  $C=475 \text{ kg/m}^3$ , valor máximo apresentado pelas recomendações do ACI 237R-07, e realizar três traços de concreto, sendo o referência com 0% de filer calcário e outros dois traços com 20% e 40% de filer em substituição à massa de cimento Portland. Outro parâmetro fixo dos concretos era a classe de espalhamento, escolhida como SF2, cujo diâmetro final de espalhamento deve estar contido no intervalo de 660 a 750 mm. Os concretos que atendem

a essa classe são adequados para a maioria das aplicações correntes, segundo a NBR 15823-1:2017. Como os traços realizados tinham apenas variação da substituição de cimento Portland por adição mineral, os ajustes foram feitos no teor de superplastificante. Esses traços produzidos estão apresentados na Tabela 1. Em todo o trabalho os concretos serão denominados REF, CAA20 e CAA40, de acordo com o teor de substituição que foi empregado nas respectivas misturas.

**Tabela 1** - Traços utilizados na produção dos concretos autoadensáveis

	<b>Ag:</b>	<b>Cimento:</b>	<b>Filler:</b>	<b>Areia Rosa:</b>	<b>Areia Britada:</b>	<b>Brita 12,5 mm:</b>	<b>Brita 19 mm:</b>	<b>Relação a/agl</b>	<b>SP (%)</b>	<b>C (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>REF</b>	1	1	0	0,64	1,03	0,46	1,08	0,55	0,35	475
<b>CAA20</b>	1	0,8	0,2	0,64	1,02	0,46	1,07	0,55	0,34	380
<b>CAA40</b>	1	0,6	0,4	0,63	1,01	0,46	1,06	0,55	0,37	285

Sendo: C = consumo de cimento, SP = Superplastificante, Agl = Aglomerante

## 2.2 Propriedades mecânicas

Para todos os ensaios foram moldados copos de prova cilíndricos de dimensões 100 x 200 mm, confeccionados de acordo com a NBR 5738:2008 e depois regularizados no topo por meio de retífica. Todos os corpos de prova foram curados em câmara úmida até as idades desejadas. O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado de acordo com a NBR 5739:2007 nas idades de 7, 14 e 28 dias. Aos 28 dias também foi executado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, seguindo as recomendações da norma NBR 7222:2011.

## 2.3 Ensaio de carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado conforme as recomendações da ISO 1920-12:2015. Foram moldados corpos de prova prismáticos de 400 x 100 x 100 mm. A câmara de carbonatação acelerada utilizada tem parâmetros de funcionamento de acordo com o estabelecido pela ISO 1920-12: 2015. Tal norma fixa as condições de ensaio, sendo a temperatura de  $22 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $55 \pm 5\%$ , porém para locais de clima quente, como é o caso do Brasil, os valores sofrem alteração, passando para uma temperatura de  $27 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $65 \pm 5\%$ . A concentração de CO<sub>2</sub> deve ser de  $3,0 \pm 0,5\%$ , em volume, para qualquer condição climática. Após 28 dias de cura úmida os corpos de prova passaram por um período de 14 dias de pré-condicionamento para estabilização da umidade interna. Antes de serem inseridos na câmara de carbonatação eles foram selados com parafina, deixando apenas duas faces expostas às condições de ensaio para um direcionamento no fluxo de difusão do CO<sub>2</sub>. Eles foram então colocados na câmara de carbonatação acelerada por 70 dias e foram realizadas medições do avanço da frente de carbonatação utilizando uma solução de fenolftaleína indicadora de pH, com 56, 63 e 70 dias de exposição. Em cada idade foi retirado um fragmento do corpo de prova para determinar a carbonatação e o restante foi novamente selado com parafina e retornou para a câmara para continuidade do ensaio.

### 3.- RESULTADOS E DISCUSSÕES

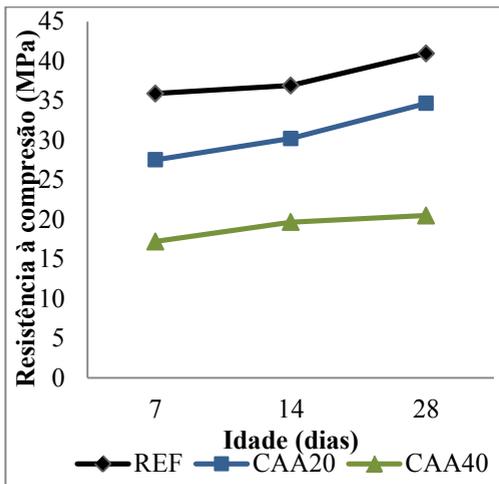
#### 3.1 Propriedades mecânicas

Na Tabela 2 têm-se o resumo dos resultados encontrados após os ensaios das propriedades mecânicas, bem como os desvios padrões dos mesmos, uma vez que foram moldados três corpos de prova para avaliação de cada propriedade.

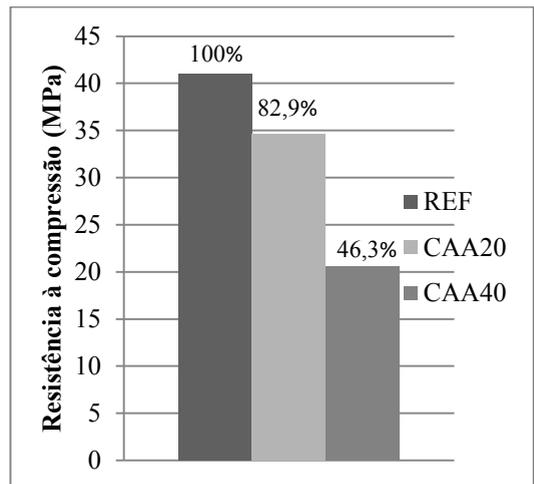
**Tabela 2** - Resumo dos resultados das propriedades mecânicas dos concretos produzidos

	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Desvio padrão
REF	41,0	3,28	4,1	0,33
CAA20	34,7	2	3,4	0,15
CAA40	20,5	0,48	2,2	0,1

Determinou-se a resistência à compressão dos concretos nas idades de 7, 14 e 28 dias. As Figura 22 (a) e (b) apresentam gráficos dos valores obtidos.



**Figura 2 (a)** - Resistência à compressão dos concretos aos 7, 14 e 28 dias.



**Figura 2 (b)** - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.

Observa-se no gráfico da Figura 1 (a) que todos os concretos apresentaram ganho de resistência com o avanço da idade, porém esse aumento foi menos acentuado no CAA40, o que pode ser atribuído a alta relação água/aglomerante dos concretos em conjunto ao menor consumo de cimento Portland (285 kg/m<sup>3</sup>) desse concreto. Na Figura 1 (b) têm-se um gráfico com a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias e com o percentual desses

valores em relação ao REF, que é o concreto de referência. Observa-se que houve uma perda de 15,4% na resistência com o teor de 20% de filer calcário e que esse valor passou para 50% quando o teor de substituição aumentou para 40%. Esse resultado está de acordo com o encontrado por Zhao et al. (2015) [15] que produziram CAA com substituições de 20, 30 e 40% do cimento Portland por diferentes adições minerais e encontraram que a resistência à compressão diminuía a medida que o percentual de substituição aumentava.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, verifica-se pelo gráfico da Figura 2 que o CAA20% apresentou uma perda de 17,1% enquanto no CAA40% esse decréscimo foi de 46,3%. Esses percentuais de perda são semelhantes ao observado na resistência à compressão simples.

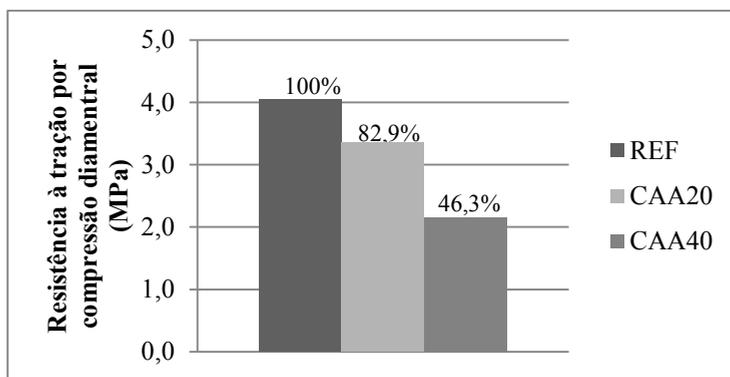


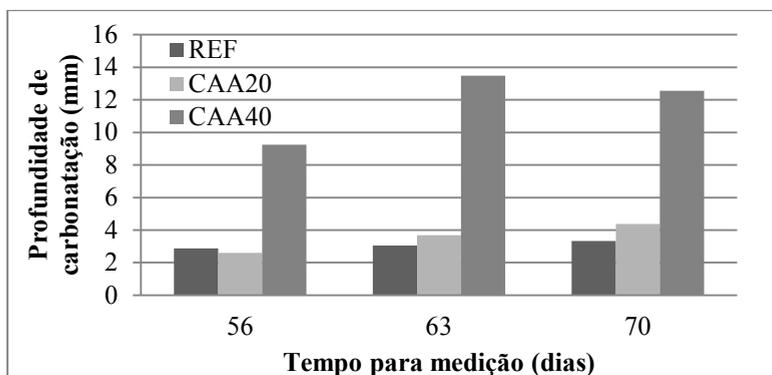
Figura 2 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias de idade

### 3.2 Ensaio de carbonatação acelerada

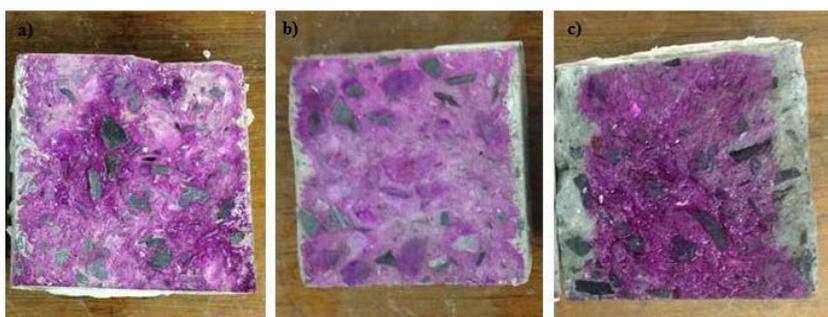
Na Figura 3 tem-se o gráfico do avanço da frente de carbonatação de todos os concretos estudados, nos tempos de medição recomendados pela ISO 1920-12:2015, isto é, 56, 63 e 70 dias de exposição à câmara de carbonatação. É possível observar que houve um aumento da profundidade de carbonatação com o aumento do teor de substituição de cimento Portland por filer calcário. Em relação ao concreto de referência (REF), cuja profundidade de carbonatação foi pequena devido às características do CAA que o tornam menos poroso que o concreto convencional, a profundidade de carbonatação teve um aumento de 31,20% para o CAA20 e de 277,20% para o CAA40, aos 70 dias. Na Figura 4 são apresentadas as seções dos corpos de prova com a solução de fenolftaleína e pode-se observar esse aumento da profundidade de carbonatação. Como o CAA40 possui um menor teor de cimento era esperada uma maior profundidade de carbonatação, uma vez que o menor conteúdo de portlandita induz uma maior taxa de difusão [16].

Elgalhud et al (2016) [17] encontraram que a carbonatação do concreto aumenta com o aumento do teor de filer calcário, sendo esse aumento da ordem de 50% com 30% de substituição de cimento Portland por filer calcário. Este efeito, no entanto, é menos acentuado se o concreto for dosado tendo como base uma mesma resistência à compressão

de um concreto apenas com cimento Portland do que se o critério utilizado for a mesma relação a/c. Turk et al. (2012) [18] comparam CAA com diferentes teores de substituição de cimento Portland por cinza volante (CV) e sílica ativa (SA) a um concreto convencional (CC) e encontraram que a resistência à carbonatação do CC foi menor do que a de todas as misturas de CAA para todos os períodos de carbonatação acelerada analisados. Porém, a resistência à carbonatação do CAA diminuiu com o aumento do teor de CV e SA. Lye et al (2015) afirmam que, em termos gerais, há consenso na literatura publicada nos últimos 35 anos que o uso de cinzas volantes em adição ao cimento no concreto causa aumento da carbonatação, cuja extensão, em geral, aumenta com o aumento do teor de adição. A escala exata deste aumento na carbonatação pode variar dependendo de uma série de fatores associados com os parâmetros de concepção da mistura (mesma resistência ou mesma relação a/c), características químicas e físicas da cinza volante utilizada e da estrutura de poros do concreto endurecido.



**Figura 3** - Profundidade de carbonatação dos corpos de prova nos tempos de medição analisados



**Figura 4** - Profundidade de carbonatação dos corpos de prova prismáticos após 70 dias de exposição a) REF; b) CAA20 e c) CAA40

Na Figura 5 tem-se a correlação entre a resistência a compressão aos 28 dias e a profundidade de carbonatação após 70 dias na câmara, para os três traços produzidos. Nota-

se que quanto maior a resistência à compressão, menor a profundidade da carbonatação, mesmo resultado encontrado por Owsiak e Grzmil (2014) [19], que produziram traços de CAA com 40% de adição de filer calcário, cinza volante e escoria granulada de alto-forno.

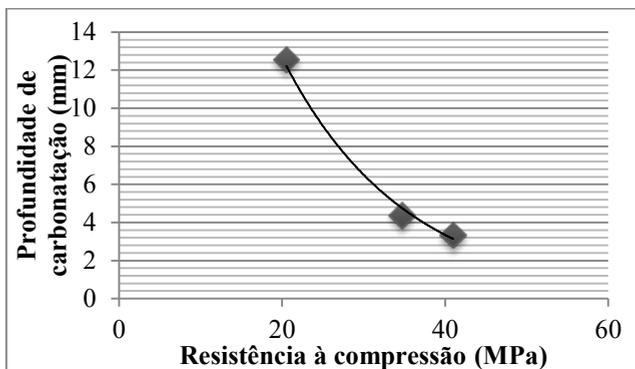


Figura 5 - Correlação entre a profundidade de carbonatação aos 70 dias e a resistência à compressão aos 28 dias

Mohammed et al. (2013) [20] produziram traços de argamassas e concretos autoadensáveis com 33% de substituição de cimento Portland por filer calcário, cinza volante e uma combinação de cinza volante e sílica ativa. Antes da exposição ao teste acelerado, o CAA com filer apresentou uma maior quantidade de CH do que o com cinza volante e sílica ativa, e ainda assim apresentou uma maior profundidade de carbonatação que os demais. Esse resultado pode indicar que a progressão da carbonatação no CAA não é apenas controlada quimicamente, mas sim que a estrutura dos poros pode desempenhar um papel substancial na determinação dessa progressão.

#### 4.- CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos foi possível avaliar os concretos produzidos em relação a durabilidade. Sabe-se que, geralmente, o CAA apresenta melhores indicadores de durabilidade do que o concreto convencional. Quanto às propriedades mecânicas, mesmo com a diminuição na resistência à compressão o CAA20 se enquadra na classe de agressividade ambiental III da NBR 6118: 2014. Assim, tem-se a possibilidade de utilização de um concreto com um teor de cimento 20% menor, o que gera economia no consumo de cimento, além de aproveitamento do filer calcário e conseqüente diminuição de impactos ambientais. O CAA40, por sua vez, só poderia ser utilizado em ambientes com classe de agressividade I, isto é, fraca, o que o torna um material inadequado para questões de durabilidade. O comportamento da resistência à tração por compressão diametral foi semelhantes ao observado na resistência à compressão simples.

No ensaio de carbonatação acelerada foi observado um aumento na profundidade de carbonatação com o aumento do teor de filer calcário nas misturas. Este resultado também está em concordância com outros estudos realizados em CAA com adições minerais substituindo cimento Portland em alguma proporção, que no geral observaram que, quanto

maior o teor de substituição, maior a profundidade de carbonatação. Também nessa propriedade o desempenho do CAA40 foi bem inferior aos demais. Ainda assim, a profundidade de carbonatação média desse concreto foi de 1,26 cm, valor abaixo da espessura de cobrimento mínima recomendada pela NBR 6118: 2014. Portanto, considerando-se o tempo de exposição analisado, a frente de carbonatação não atingiria a armadura.

## REFERENCIAS

- [1] MELO, K. A. DE. **Contribuição à Dosagem de Concreto Auto-Adensável com Adição de Filer Calcário**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [2] OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete. Development, present use and future**. In: **INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SCC**, 1st 1999, Stockholm. rance: RILEM Publications, 1999, p.3-14.
- [3] EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICAL AND CONCRETE SYSTEMS - EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use**. Londres. EFNARC, maio 2005. 63p.
- [4] TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. 1. ed. São Paulo: Editora PINI, 2008.
- [5] CALADO, C. et al. Durability Indicators Comparison for SCC and CC in Tropical Coastal Environments. **Materials**, [s.l.], v. 8, n. 4, p.1459-1481, 2015.
- [6] CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. São Paulo: Ed. Pini, 1999.
- [7] MEHTA. P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: Ed. IBRACON, 2014.
- [8] TAYLOR, H. F. W. (1997). **Cement Chemistry**. 2 ed. Londres. Thomas Telford
- [9] CAPUZZO, Valdirene Maria Silva. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. 281 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [10] NUNES, Douglas Garcez. **Carbonatação Acelerada em Concretos Compostos Com Cinza de Casca de Arroz de Diferentes Teores de Carbono Grafítico**. 2014.

148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

- [11] RICHARDSON, M. G. (1998). **Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management**. New York: CITIS Ltd, Publishers.
- [12] INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 1920-12:2015** – Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method. Geneva, Switzerland.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projetos de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [15] ZHAO, H.; SUN, W.; WU, X.; GAO, B. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal Of Cleaner Production**, v. 95, p.66-74, 2015.
- [16] CALVO, J. L. G.; ALONSO, M. C.; LUCO, L. F.; VELASCO, M. R. Durability performance of sustainable self compacting concretes in precast products due to heat curing. **Construction And Building Materials**, v. 111, p.379-385, 2016.
- [17] ELGALHUD, Abdurrahman A.; DHIR, Ravindra K.; GHATAORA, Gurmel. Limestone addition effects on concret porosity. **Cement and Concrete Composites**. n. 76, p. 222-234, 2016
- [18] TURK, K.; KARATAS, M.; GONEN, T. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive Strength, Sorptivity and Carbonation of SCC. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, v. 17, p.202-209, 2012.
- [19] OWSIAK, Z.; GRZMIL, W. The Evaluation of the Influence of Mineral Additives on the Durability of Self-Compacting Concretes. **KSCE Journal Of Civil Engineering**, v. 19, p.1-7, 2014.
- [20] MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Carbonation of filler typed self-compacting concrete and its impact on the microstructure by utilization of 100% CO2 accelerating techniques. **Construction And Building Materials**, v. 50, p.508-516, 2013.