

## **Indicadores de durabilidade de concreto auto-adensável em ambiente quente e agressivo. Comparativo com concreto convencional**

**Carlos Calado<sup>1</sup>**

**Aires Camões<sup>2</sup>**

**Eliana  
Monteiro<sup>3</sup>**

**Paulo Helene<sup>4</sup>**

**Béda  
Barkokébas<sup>5</sup>**

### **RESUMO**

O concreto auto-adensável (CAA) necessita de ser mais estudado no que concerne à durabilidade em ambientes mais agressivos e de maior temperatura, comparativamente ao concreto convencional vibrado (CC). O presente trabalho objetiva apresentar os resultados de indicadores de durabilidade de CAA e CC de igual relação água/ligante e mesmos constituintes. A metodologia aplicou ensaios de resistência mecânica, resistividade elétrica, difusão de íons cloreto e carbonatação acelerada, dentre outros, bem como estudo de micro estrutura com ensaios de microscopia eletrônica de varredura e micro tomografia. Os ensaios se desenvolveram em laboratório de pesquisa e na obra da Arena Pernambuco. O CAA apresentou resistência à compressão 7,4% maior que o CC aos 28 dias; resistividade elétrica média 11,4% superior; difusão de íons cloreto com média de 63,3% do CC; frente de carbonatação com média de 45,8% do CC; porosidade com média de 55,6% do CC. Pelos resultados, ficou demonstrado que o CAA pode ser mais durável que o CC, contribuindo para elucidar os aspectos relacionados à sua durabilidade e consequente vida útil.

**Palavras-chave:** concreto auto-adensável (CAA), concreto convencional vibrado (CC) e durabilidade

### **1. INTRODUÇÃO**

Nas estruturas, o concreto normalmente estará associado a armaduras formando o concreto armado ou o concreto protendido. A estrutura interagirá com o meio ambiente onde ela se insere e, conseqüentemente, seus materiais constituintes estarão sujeitos a desenvolver reações que possam alterar suas condições iniciais, deixando eles de cumprir o papel para o qual foram projetados, comprometendo-se assim sua durabilidade. Segundo Neville [1] o concreto deve ser capaz de suportar o processo de deterioração que se espera quando ele está exposto ao meio ambiente. Quando isso ocorre, pode-se dizer então que o concreto deverá ser durável. Porém, vida útil indefinida não significa durabilidade, muito menos suportar qualquer ação sobre o concreto. Neville [1] reconhece que sempre se deu maior importância à propriedade de resistência do concreto, no entanto, nos dias atuais se assume que concreto forte é concreto durável, e que tanto resistência quanto durabilidade, ambas as propriedades, devem ser consideradas e explicitadas ainda na fase de projeto.

---

<sup>1</sup> C-TAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, PORTUGAL. [carlos.calado@upe.br](mailto:carlos.calado@upe.br)

<sup>2</sup> C-TAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, PORTUGAL. [aires@civil.uminho.pt](mailto:aires@civil.uminho.pt)

<sup>3</sup> Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. [eliana@poli.br](mailto:eliana@poli.br)

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, Brasil. [paulo.helene@concretophd.com.br](mailto:paulo.helene@concretophd.com.br)

<sup>5</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Brasil. [beda.jr@upe.br](mailto:beda.jr@upe.br)

Entende-se que à exceção dos danos mecânicos, as influências adversas sobre a durabilidade envolvem o transporte de fluidos tais como água pura ou carreando íons cloreto, gás carbônico e oxigênio. Esses fluidos, líquidos e gases, podem penetrar e se mover dentro do concreto em diferentes caminhos através de meio poroso, não apenas pela fluidez, mas também pela difusão e absorção. Os poros interconectados contribuem para elevar a permeabilidade. Já a absorção é o resultado do movimento capilar nos poros do concreto que estão abertos ao meio ambiente, onde a sucção capilar pode ocorrer apenas nos concretos parcialmente secos, inexistindo absorção de água em concretos totalmente secos ou saturados. Por outro lado, a difusão ocorre quando o transporte de um gás ou vapor através do concreto é o resultado de gradiente de concentração e não de um diferencial de pressão, onde gás carbônico leva à carbonatação da pasta hidratada e o oxigênio permite o progresso da corrosão das armaduras envolvidas pelo concreto. Assim, concreto denso e pouco permeável reduz muito o ingresso de agentes agressivos no seu interior, limitando os ataques corrosivos apenas à sua superfície. Relação água/cimento, temperatura, grau de hidratação, adições minerais, porosidade capilar, permeabilidade, dentre outros fatores, influenciam nas propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável (CAA) e concreto convencional vibrado (CC) [2,3,4].

No Brasil, a partir de 2003 com a entrada em vigor da nova norma NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto – Procedimento [5], o conceito e as medidas para obtenção de maior durabilidade das obras em concreto passaram a fazer parte mais efetiva da atuação dos projetistas de estruturas de concreto no desenvolvimento dos seus trabalhos. O Recife, cidade litorânea, capital do estado de Pernambuco, considerada a quinta maior população metropolitana do Brasil com 3,9 milhões de habitantes (julho/2014), combina condições especialmente nocivas para estruturas de concreto armado, tais como valores médios anuais para temperatura máxima igual a 29,1°C, umidade relativa do ar igual a 79,8%, precipitação pluviométrica de 2.417,6mm, horas de sol igual a 2.550,7h, além da atmosfera marinha em face à proximidade do mar (Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Recife#Clima>) [6]. Trata-se, portanto, de um ambiente propício para aumento da taxa de difusão dos cloretos e contaminação por carbonatação no concreto, dentre outros fatores que contribuem para a deterioração do concreto e suas armaduras. A quantidade de obras de concreto convencional que não atingem a idade prevista no projeto tende a ser mais elevada, caso medidas mitigadoras não sejam adotadas nas etapas de projeto, execução e manutenção [7,8,9]. Outro aspecto relevante na região do Recife foi a ocorrência de patologias tipificadas como reação álcali-agregado [10].

Para os estudos em laboratório de pesquisa buscou-se estabelecer duas composições similares de concreto, uma para CAA (CAA\_Lab) e outra para CC (CC\_Lab), com constituintes usualmente encontrados e aplicados na região em estudo, assegurando-se maior identidade e representatividade possíveis com os concretos ali aplicados. Considerou-se a similaridade entre as composições de CAA\_Lab e CC\_Lab devido à adoção da mesma relação água/ligante e cimento/finos, bem como aplicação dos mesmos constituintes em ambas as composições. Os estudos desenvolvidos foram feitos através de ensaios no concreto endurecido de resistência à compressão, resistividade elétrica, difusão de íons cloreto, carbonatação acelerada, cálculo do índice de vazios, e absorção de água por capilaridade, aplicados a amostras de CAA\_Lab e CC\_Lab. É possível encontrar bibliografia específica recente abrangendo aspectos relacionados com durabilidade e resistência aplicados para CAA e CC, a partir de variação na relação água/cimento, cimento, composição do ligante, adições minerais como metacaulim. Esses estudos tiveram por objetivo avaliar o comportamento do CAA e do CC, comparando o desempenho entre eles, para resistência a sulfatos, carbonatação, porosidade, resistividade elétrica, permeabilidade, penetração de cloretos. Os resultados demonstraram que em geral o CAA apresenta melhor desempenho que o CC e que é possível estabelecer uma composição mais adequada para cada concreto de determinada característica de resistência e durabilidade requeridas em face das solicitações mecânicas e condições ambientais onde o concreto se insere [11,12,13].

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Método de dosagem, constituintes e composições dos concretos utilizados na pesquisa

O método de dosagem de concreto INT/Lobo Carneiro [14] foi aplicado nesse estudo. Trata-se de um método que tem por referência, principalmente, a busca constante de uma proporção ótima a partir das composições granulométricas dos agregados em questão, procurando obter uma mistura de concreto com a máxima compacidade possível. As atividades, variáveis e informações de entrada do método podem ser assim resumidas: a resistência de dosagem exigida a uma determinada idade e exigências de durabilidade conduzem ao tipo de cimento; curvas de Abrams e fator água/cimento em função das exigências de trabalhabilidade conduzem à relação água/cimento; processo de adensamento e dimensão máxima característica do agregado conduzem à relação água/materiais secos, que associado à relação água/cimento, conduzem à relação agregado/cimento; em seguida determina-se a percentagem de cimento na composição do concreto e, na sequência, a determinação das proporções dos agregados constituintes da mistura, através das curvas granulométricas ótimas propostas por Lobo Carneiro.

As composições adotadas para o CAA e o CC procuraram assegurar maior similaridade entre elas. Assim, buscou-se encontrar a quantidade de cimento em cada composição que permitisse obter a mesma relação água/cimento e relação cimento/finos. Dessa forma, para as composições aplicadas nos ensaios nos laboratórios de pesquisa, obteve-se 419 kg/m<sup>3</sup> de cimento para o CAA e 416 kg/m<sup>3</sup> de cimento para o CC. Também, os demais constituintes utilizados tais como agregados e aditivos, foram os mais usualmente aplicados na região de Recife, destacando-se ainda o emprego de adição metacaulim nas composições para aplicação nos laboratórios de pesquisa, CAA\_Lab e CC\_Lab, devido ao fato de que o metacaulim vem sendo utilizado como alternativa para combater preventivamente reações deletérias do tipo álcali-agregado conforme verificado na região [15].

Para os estudos em laboratório de pesquisa utilizou-se cimento Portland CP-V ARI, alta resistência inicial, que é equivalente na Europa ao cimento CEM-I 42,5. Os aditivos aplicados foram: plastificante com alto poder de redução de água, composto por sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso, densidade igual a 1,19 kg/litro e pH de 5,5; aditivo líquido superplastificante de pega normal de terceira geração, composto por solução de policarboxilatos em meio aquoso, densidade igual a 1,06 kg/litro e pH de 5,0. Os agregados finos e grossos utilizados foram os disponíveis no mercado, e os mesmos aplicados para as duas composições CAA\_Lab e CC\_Lab. O agregado grosso foi britado, a partir de rocha granítica, e o agregado fino utilizado foi de origem quartzosa, extraída de jazida de leito de rio. A água utilizada para as composições para ensaios em laboratório foi fornecida pela Compesa, a concessionária local de água tratada para consumo da população.

O Quadro 1 apresenta as composições para CAA e CC adotadas nos ensaios da presente pesquisa, CAA\_Lab e CC\_Lab. As quantidades de cada um dos constituintes estão indicadas para cada metro cúbico de concreto. No Quadro 1 apresenta-se, também, o resultado do ensaio de abaixamento realizado para o CC e do ensaio de espalhamento do CAA.

Quadro 1. Composições de CAA e CC para realização dos ensaios.

<i>Componentes</i>	<i>Unidade</i>	<i>CAA_Lab</i>	<i>CC_Lab</i>
Cimento CP-V ARI	kg/m <sup>3</sup>	419	416
Metacaulim	kg/m <sup>3</sup>	36	36
Areia	kg/m <sup>3</sup>	947	661
Brita 1 12.5 mm	kg/m <sup>3</sup>	227	-
Brita 2 19.1 mm	kg/m <sup>3</sup>	529	1028
Água	kg/m <sup>3</sup>	205	203
Superplastificante	kg/m <sup>3</sup>	5	0
Plastificante	kg/m <sup>3</sup>	4,2	2,6
Água/ligante	-	0,45	0,45
Cimento/fino	-	0,92	0,92
Espalhamento ou abaixamento	mm	700	120±20

## **2.2 Procedimento para obtenção dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios da pesquisa**

Os corpos-de-prova (CPs) aplicados nos ensaios da pesquisa foram obtidos em atendimento à NBR 5738 (2003) [16] no que concerne ao procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.

Após atendimento às recomendações de moldagem e cura inicial, os CPs CAA\_Lab e CC\_Lab foram armazenados em câmara úmida até o momento em que foram retirados para a realização dos ensaios. A câmara úmida foi mantida à temperatura de  $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$ , com umidade relativa do ar superior a 95%.

## **2.3 Resistência mecânica à compressão do concreto.**

Foi realizado o ensaio de resistência mecânica à compressão axial em corpos-de-prova de concreto endurecido nas idades de 3, 7, 14, 28, 56 e 90 dias de acordo com a ABNT NBR 5739 (2007). Para esse ensaio foram preparados seis corpos de prova de geometria cilíndrica com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sendo: três de concreto auto-adensável (CAA) e três de concreto convencional (CC), totalizando seis exemplares por cada uma das idades adotadas. Antes da execução dos ensaios, as bases dos corpos-de-prova foram retificadas de acordo com a NBR 5738 (2003).

## **2.4 Resistividade elétrica do concreto.**

A resistividade elétrica significa a capacidade relativa de um meio conduzir corrente elétrica. Dessa forma, após a dissolução ou quebra da camada passivante, a resistividade do concreto passa a ser um dos fatores que influenciam na velocidade de corrosão. O método de medida é não destrutivo e indica a resistividade superficial do concreto, que depende preponderantemente da quantidade de eletrólito, água e sais, contidos nos interstícios do concreto [17]. O ensaio de resistividade elétrica foi realizado de acordo com a RILEM TC154-EMC [18]. Para esse ensaio foram preparados seis corpos-de-prova, sendo: três de concreto auto-adensável (CAA\_Lab) e três de concreto convencional vibrado (CC\_Lab), totalizando seis exemplares. Os corpos-de-prova utilizados tinham dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. As leituras de resistividade elétrica foram realizadas para as idades de 3, 7, 28, 56 e 90 dias. A 'Fig 1' e a 'Fig 2', mostram o equipamento sendo aplicado para a medição da resistividade elétrica nos corpos-de-prova.



Figura 1. Visualização do equipamento.



Figura 2. Medição da resistividade elétrica.

O critério empregado para análise e classificação da taxa de corrosão provável, em função da resistividade elétrica do concreto, está apresentado no Quadro 2, de acordo com o CEB 192 [19].

<u>Quadro 2. Probabilidade de corrosão em função da resistividade elétrica CEB 192 [19].</u>	
<u>Resistividade do concreto <math>\rho(k\Omega.cm)</math></u>	<u>Taxa de corrosão provável</u>
> 20	Desprezível
Entre 10 e 20	Baixa
Entre 5 e 10	Alta
< 5	Muito alta

## **2.5 Ensaio de difusão de íons cloreto**

A difusão de cloretos pela pasta de cimento é importante de ser avaliada uma vez que esses íons podem levar ao desencadeamento do processo de corrosão das armaduras, uma das manifestações patológicas mais comumente identificadas no concreto. Estima-se que a taxa de difusão varie linearmente com a temperatura e seja inversamente proporcional à idade do concreto (ABCP, 2012). Foram realizados no laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) os ensaios de determinação da difusão de íons cloreto em corpos-de-prova nas idades de 28 e 90 dias, de acordo

com a ASTM C1202 [20]. Para esse tipo de ensaio em laboratório foram preparados seis corpos-de-prova, sendo: três de concreto auto-adensável (CAA) e três de concreto convencional vibrado (CC), totalizando seis exemplares por cada uma das idades adotadas. A carga total passante em Coulombs (C) é relacionada com a resistência do concreto à penetração de íons cloretos. Os resultados obtidos são semiquantitativos, tendo em vista a amplitude das faixas classificatórias apresentadas na ASTM C1202 [20], conforme apresentado no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3. Critério de classificação para difusibilidade de cloretos. ASTM C1202 [20].

<i>Carga passante (Coulombs)</i>	<i>Penetração de íons cloretos</i>	<i>Típico</i>
> 4000	Elevada	Elevada relação a/c (> 0,60)
2000 - 4000	Moderada	Moderada relação a/c (0,40-0,50)
1000 - 2000	Baixa	Baixa relação a/c (< 0,40)
100 - 1000	Muito baixa	Concreto látex modificado
< 100	Desprezível	Concreto com polímero impregnado

## 2.6 Ensaio de carbonatação acelerada

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado em amostras de concreto endurecido com idades de 28 e 90 dias que seguiu recomendações da RILEM TC056-CPC-18 [21]. Para esse ensaio foram preparados oito corpos-de-prova para cada uma das idades, sendo: quatro de concreto auto adensável (CAA\_Lab) e quatro de concreto convencional (CC\_Lab), totalizando dezesseis amostras de geometria cilíndrica de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Os corpos-de-prova ficaram armazenados em condições de laboratório até o momento da realização do ensaio, até constância de massa mantendo-se as condições de umidade e temperatura similares às da câmara de carbonatação. Os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de carbonatação acelerada foram acondicionados em uma câmara de carbonatação com um teor de  $7,5 \pm 2,5\%$  de  $\text{CO}_2$ , umidade relativa interna de  $70 \pm 10\%$  e temperatura média de  $29^\circ\text{C}$ . O tempo de exposição na câmara de carbonatação foi de 22 dias corridos. Considerou-se suficiente esse período para atendimento ao objetivo de obtenção de comparativo entre os resultados para as amostras de CAA e CC. Transcorridos os 22 dias de ensaio, os corpos-de-prova foram retirados da câmara e rompidos no sentido longitudinal. Posteriormente foi aspergida solução de fenolftaleína a 0,1% nas superfícies recém-expostas, quando então foram medidos os oito maiores pontos de avanço da frente de carbonatação conforme mostrado na 'Fig 3' e na 'Fig 4'.



Figura 3. Visualização da carbonatação.



Figura 4. Medição da carbonatação.

## 2.7 Ensaio de absorção de água por capilaridade

Foi realizado o ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade em concreto endurecido de acordo com a ABNT NBR 9779 (2012), que prescreve o método para determinação da absorção de água, através de ascensão capilar, de argamassa e concreto endurecidos. Para esse ensaio foram preparados seis corpos-de-prova, sendo: três de concreto auto-adensável (CAA) e três de concreto convencional (CC), totalizando seis exemplares por cada uma das idades adotadas. As idades adotadas nos ensaios em laboratório de pesquisa foram 28 e 90 dias. A absorção de água por capilaridade deve ser expressa em  $\text{g}/\text{cm}^2$  e calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo de prova em contato com a água, de acordo com a 'Eq. (1)'.

$$C = \frac{(A - B)}{S} \quad (1)$$

Onde: C = absorção de água por capilaridade, em g/cm<sup>2</sup>; A = massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g; B = massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23+/-2)<sup>o</sup>C, em g; S = área da seção transversal, em cm<sup>2</sup>.

## 2.8 Ensaio de cálculo do índice de vazios.

Foi realizado o ensaio de determinação do índice de vazios em concreto endurecido de acordo com a ABNT NBR 9778 (2009). As idades adotadas nos ensaios em laboratório de pesquisa foram 28 e 90 dias. Para os efeitos da Norma, aplicam-se as seguintes definições: Absorção de água por imersão (A) = processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso, portanto, o incremento de massa devido a essa penetração de água, em relação à sua massa em estado seco; Índice de vazios (I<sub>v</sub>) = relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra; Massa específica da amostra seca (ρ<sub>s</sub>) = relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis; Massa específica da amostra saturada (ρ<sub>sat</sub>) = relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis; Massa específica real (ρ<sub>r</sub>) = relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis. Para esse ensaio foram preparados seis corpos-de-prova, sendo: três de concreto auto-adensável (CAA) e três de concreto convencional (CC), totalizando seis exemplares. Os resultados foram obtidos aplicando-se as 'Eqs (2), (3) e (4)'.

$$A \text{ (absorção)} = [(m_{\text{sat}} - m_s) / m_s] \times 100 \quad (2)$$

$$I_v \text{ (índice de vazios)} = [(m_{\text{sat}} - m_s) / (m_{\text{sat}} - m_i)] \times 100 \quad (3)$$

$$\rho_s \text{ (massa específica da amostra seca)} = m_s / (m_{\text{sat}} - m_i) \quad (4)$$

Onde: m<sub>sat</sub> = massa saturada; m<sub>i</sub> = massa da amostra saturada imersa em água após fervura; m<sub>s</sub> = massa seca determinada nos corpos-de-prova após secagem em estufa por período de 72 h.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Resistência mecânica à compressão

O Quadro 4 apresenta os resultados de resistência mecânica à compressão em laboratório de pesquisa.

Quadro 4. Resultados dos ensaios de resistência à compressão em MPa.

<i>Idade (dias)</i>	<i>CAA_Lab</i>	<i>CC_Lab</i>
3	33,98 ± 1,71	32,32 ± 1,33
7	36,19 ± 4,87	33,03 ± 2,70
14	44,69 ± 1,31	40,39 ± 0,90
28	45,86 ± 2,33	42,69 ± 0,25
56	45,36 ± 2,38	43,80 ± 0,52
90	54,44 ± 2,57	43,28 ± 1,55

Analisando-se o Quadro 1, verifica-se que as composições adotadas para CAA e CC são bastante similares: praticamente mesmo consumo de cimento, 419 kg/m<sup>3</sup> para CAA e 416 kg/m<sup>3</sup> para CC; igual consumo de adição de metacaulim, 36 kg; igual relação água/ligante de 0,45; igual relação cimento/finos de 0,92. Esperavam-se então resistências muito próximas para o CAA e o CC. A principal diferença entre os concretos aplicados foi a utilização dos aditivos: 0,58% de plastificante/ligante para o CC e 0,92% de plastificante/ligante mais 1,10% de superplastificante/ligante para o CAA. Assim, pode ser estabelecida a hipótese de que os aditivos melhorem a hidratação do cimento, além do fato do CAA conter maior quantidade de agregados finos, provocando dessa forma aumento no resultado final da resistência do CAA em relação ao CC. Desnerck [22] em seu trabalho de pesquisa, baseado em banco de dados com mais de 250 resultados de artigos publicados, encontrou na comparação entre resistências à compressão aos 28 dias de idade para CAA e CC, valores 10% mais elevados para o CAA, atribuída à maior densidade da sua microestrutura.

### 3.2 Resistividade elétrica do concreto

Apresenta-se na Figura 5, a média dos resultados dos ensaios de resistividade elétrica, três medições para cada idade e concreto, expresso em  $k\Omega \cdot cm$ , para as amostras de CAA\_Lab e CC\_Lab, nas idades de 3, 7, 28, 56 e 90 dias. Aos 28 dias, o CAA apresentou resistividade 9,1% superior em relação ao CC, enquanto que aos 90 dias esse percentual foi de 7,3%. Esse melhor desempenho do CAA pode ser explicado como o CAA apresentando-se com melhor hidratação em relação ao CC. Por outro lado, considerando o Quadro 2 que apresenta a probabilidade de corrosão em função da resistividade elétrica do concreto com base no CEB 192 (1989), verifica-se que CAA e CC, tanto aos 28 dias quanto aos 90 dias, apresentaram probabilidade desprezível de corrosão, apesar da maior resistividade do CAA em relação ao CC. Esse resultado do CAA\_Lab em relação ao CC\_Lab, pode levar à conclusão de tratar-se de melhor desempenho de durabilidade uma vez que maior resistividade do concreto diminui a probabilidade de ocorrer corrosão nas armaduras. No entanto, também é possível estabelecer que a maior resistividade apresentada pelo CAA pode dever-se a uma maior perda de umidade ao longo do tempo decorrente de uma maior porosidade interconectável (menor durabilidade).

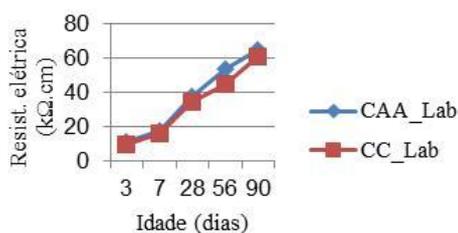


Figura 5. Resultados de resistividade elétrica.

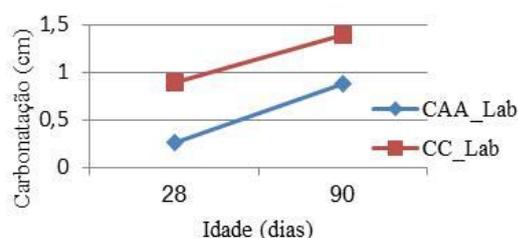


Figura 6. Resultados de carbonatação acelerada.

### 3.3 Ensaio de carbonatação acelerada

Na Figura 6, têm-se os resultados para determinação dos valores de profundidade de carbonatação no concreto com base nos ensaios de carbonatação acelerada realizados em amostras de CAA\_Lab e CC\_Lab, nas idades de 28 e 90 dias. Os resultados obtidos e apresentados são valores médios de cada grupo de quatro amostras. Verificou-se coerência nos resultados obtidos. Seja para o CAA, seja para o CC, a frente de carbonatação foi maior aos 90 dias que aos 28 dias. Como foi comentado anteriormente ao analisarem-se os resultados de resistividade elétrica, verificou-se maior umidade nas amostras de CAA e CC aos 28 dias. O que nos leva a crer que a carbonatação tem menor possibilidade de ocorrer nos concretos com maior umidade, já que os poros se encontram cheios de água dificultando, dessa forma, a entrada do  $CO_2$ . Assim, a constatação de que a frente de carbonatação para CAA e CC foi superior aos 90 dias pode ser explicado pelo fator umidade do concreto. Sabe-se que, com a umidade em torno de 50 e 75%, obtém-se maior penetração de  $CO_2$  segundo o BRE DIGEST 263 [23]. Por outro lado, tanto na idade aos 28 dias, quanto na idade aos 90 dias, os valores para frente de carbonatação obtidos foram maiores, em média, para o CC em relação ao CAA, da ordem de 245% aos 28 dias e 60% aos 90 dias. Esses resultados também são melhores que os resultados encontrados por Hartmann; Helene [24] em concreto convencional (33 MPa) onde apresentou profundidade de carbonatação de 2,8 cm quando submetido a carbonatação acelerada à temperatura de  $25^\circ C$ , umidade relativa do ar de 65 % e  $CO_2$  de 5 %. Assim, constatou-se que, pelo aspecto carbonatação acelerada, o CAA\_Lab apresentou melhor desempenho que o CC\_Lab, uma vez que quanto maior a frente de carbonatação do concreto espera-se menor durabilidade para esse concreto.

### 3.4 Ensaio de difusão de íons cloreto

Apresenta-se a seguir, através da Figura 7, os resultados dos ensaios de difusão de íons cloreto realizados em laboratório de pesquisa, que se referem ao coeficiente de difusão de cloretos obtidos em ensaio de difusão por imersão no estado não estacionário, para as amostras de CAA\_Lab e CC\_Lab

nas idades de 28 e 90 dias. Foi considerada a média das medições em cada uma das amostras ensaiadas, e o resultado (C) que representa a carga média passante em Coulombs. Em relação aos resultados desses ensaios, aos 28 dias o CC apresentou carga média passante em Coulombs 83,2% superior em relação ao CAA, enquanto que aos 90 dias esse percentual foi de 38,9%. Quanto maior a carga passante em Coulombs, maior será a penetração de íons cloreto o que acarretará redução da durabilidade do concreto e suas armaduras. Esse melhor desempenho do CAA\_Lab em relação ao CC\_Lab, apesar da mesma relação água/ligante igual a 0,45, pode ser explicado como o CAA apresentando-se melhor selado internamente em relação ao CC. Tomando-se por base a ASTM C 1202 [20], os resultados apontaram difusão de íons cloreto classificados como muito baixa para o CAA e baixa para o CC, tanto para os 28 dias, quanto para os 90 dias. Hartmann; Helene [24] analisando resultados de um concreto de 125 MPa de resistência à compressão comparado com um concreto com 33 MPa, obteve resultados de penetração de íons cloreto através do ensaio de difusão de 43C e 8000C, respectivamente. O que nos leva a crer que os resultados obtidos para o CAA neste ensaio da pesquisa mostraram excelente desempenho.

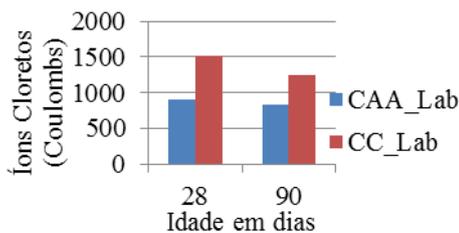


Figura 7. Resultados de difusão de íons cloreto

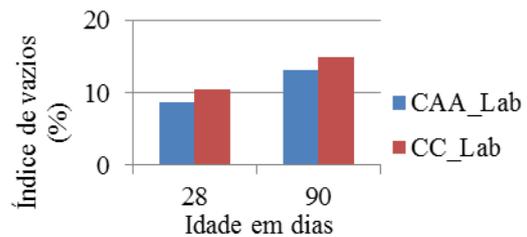


Figura 8. Resultados de índice de vazios

### 3.5 Cálculo do índice de vazios do concreto

Na Figura 8, têm-se os resultados dos ensaios de cálculo do índice de vazios realizados em laboratório de pesquisa, para as amostras de CAA e CC, nas idades de 28 e 90 dias. Foi considerada a média das medições em cada uma das amostras ensaiadas, e os resultados estão expressos em percentual (%). Tanto na idade aos 28 dias, quanto na idade aos 90 dias, os índices de vazios obtidos foram maiores para o CC em relação ao CAA, da ordem de 22% aos 28 dias e 15% aos 90 dias. Os resultados encontrados foram melhores que os resultados obtidos por Helene [24] nos ensaios realizados com um concreto convencional com 33 MPa, onde foram obtidos resultados de 5,8% de absorção após imersão e fervura e índice de vazios, após saturação e fervura, de 15,1%.

### 3.6 Ensaio de absorção de água por capilaridade

Apresenta-se a seguir, através da Figura 9, os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade realizada em laboratório de pesquisa, para as amostras de CAA e CC, para as amostras de CAA e CC nas idades de 28 e 90 dias. Foi considerada a média das medições em cada uma das amostras ensaiadas, e os resultados da absorção de água estão expressos em g/cm<sup>2</sup>. Tem-se que: LP 28 significa ensaios realizados no laboratório da pesquisa sendo 28 dias a idade da amostra, e LP 90 com a idade de 90 dias. Nos ensaios em laboratório de pesquisa, verificou-se que os resultados aos 28 dias mostraram-se aproximados para CAA e CC, enquanto que os resultados aos 90 dias não apresentaram diferenças significativas entre o CAA e o CC. Monteiro [25] também observou nos seus ensaios de absorção capilar, nos três tipos de cimentos estudados, nenhuma diferença significativa para corpos-de-prova com diferentes idades de cura.

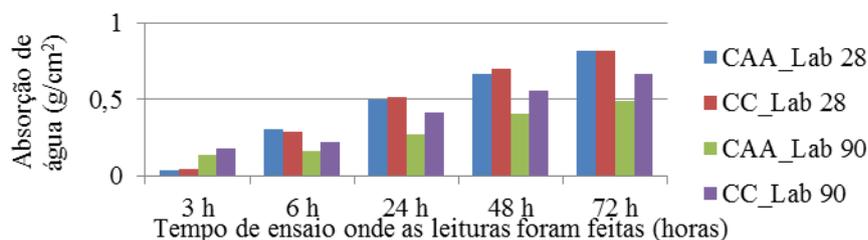


Figura 9. Resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade nos ensaios realizados

## CONCLUSÕES

Através da metodologia utilizada, com ensaios específicos aplicados em laboratório de pesquisa, podem-se comparar os dois tipos de concretos, auto adensável e convencional vibrado, em relação a durabilidade frente aos agentes agressivos. Com base nos resultados obtidos, para além do melhor desempenho de resistência mecânica à compressão do CAA em relação ao CC, é possível observar que:

- O Concreto auto adensável apresentou melhor eficiência através dos resultados dos ensaios aqui estudados comparados com o concreto convencional vibrado contribuindo para elucidar os aspectos relacionados à sua durabilidade, e, por consequência, a confiabilidade da aplicação de CAA em ambientes mais agressivos. Assim, fica demonstrado que o uso de CAA em lugar de CC de composição similar, pode contribuir para maior durabilidade das estruturas.
- O ensaio de resistividade elétrica mostrou que os resultados do CAA apresentaram taxa de corrosão provável desprezível para as idades de 28 e 90 dias, com valores absolutos de resistividade superiores ao CC. Assim, tem-se o possível indicativo de que o CAA demonstrou ser mais durável que o CC.
- O ensaio de difusão de cloretos classificou a penetração de cloretos provável como muito baixa para o CAA e baixa para o CC, tanto para os 28 dias, quanto para os 90 dias. Assim, o ensaio de difusão de cloretos confirma o ensaio de resistividade e tem-se também o indicativo de que o CAA demonstrou ser mais durável que o CC.
- No ensaio de absorção de água por capilaridade ficou demonstrado que os desempenhos do CAA e CC foram similares.
- No ensaio de índice de vazios, o CAA apresentou valores menores que o CC, o que representa indicativo de maior durabilidade.
- No ensaio de carbonatação acelerada tanto na idade aos 28 dias, quanto na idade aos 90 dias, os valores para frente de carbonatação obtidos foram maiores, em média, para o CC em relação ao CAA. Porém, constatou-se que a frente de carbonatação para CAA e CC foi superior aos 90 dias, possivelmente devido a maior umidade no concreto aos 28 dias dificultando a entrada do CO<sub>2</sub>. Dessa forma, o CAA apresentou-se com indicativo de maior durabilidade em relação ao CC.

## REFERÊNCIAS

- [1] Neville, A.M.; Brooks, J.J. (2013) Concrete Technology, 2<sup>nd</sup> ed. Copyright Licensing Agency Ltd, 90, Tottenham Court Road, London, United Kingdom, pp. 452.
- [2] De Schutter, G. (2012). Session 6: Durability. *Proc. of Joint IBRACON-RILEM Course on SCC*, Maceió-AL, Brazil.
- [3] Soroka, I. (2004) Concrete in Hot Environments, Published by E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK, pp. 179-200.
- [4] Anagnostopoulos, I.; Sideris, K.K. (2010). Assessment and Comparison of Transport Properties in Order to Evaluate the Potential Durability of Self-compacting and Conventional Concretes. *Proc. of 6<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete and the 4<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of SCC*, Montreal, Canada, pp. 1005-1012.
- [5] NBR 6118. 2014, Design of structural concrete – Procedure, ABNT. Rio de Janeiro, Brazil.
- [6] Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), Available in: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Recife#Clima>, Jan 14th/2015.
- [7] Le, V.A.; Cassagnabere, F.; Mouret, M. (2013). Influence of mixing and curing temperatures on the properties of fresh and hardened self-consolidated concrete in hot weather conditions. *Proc. of 7<sup>th</sup> RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and of the 1<sup>st</sup> RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials*, Paris, from the 1<sup>st</sup> to the 6<sup>th</sup> of September.

- [8] Ribeiro, D.V.; Helene, P.R.L. (2013). Corrosion in Concrete Structures: Theory, Control and Analysis Methods. Elsevier, p. 240.
- [9] Pade, C.; Kaasgaard, M.; Jönsson, U.; Munch-Petersen, C. (2013). Comparison of durability parameters of self-compacting concrete and conventional slump concrete designed for marine environment. *Proc. of Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Illinois, USA, May 12-15.
- [10] Andrade, T. (2006). Historic of in Recently RAA Cases Occurred in Building Foundations in Recife Metropolitan Region (in Portuguese). *II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto*, Anais IBRACON, RJ.
- [11] Loser, R., Leemann, A. (2010). The Influence of Mix Design on the Sulphate Resistance of SCC, Durability of SCC. *Proc. of 6<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete and the 4<sup>th</sup> North American Conference on the Design and Use of SCC*, Canada.
- [12] Holman, K.R., Myers, J.J., Volz, J.S. (2013). Mechanical and Durability Behavior of Self-Consolidating Concrete (SCC), SCC Chicago.
- [13] Siad, H., Mesbah, H., Kamali-Bernard, S., Mouli, M. (2013). Sulfate Resistance and Carbonation of Self-Compacting Concrete Based with Various Mineral Admixtures: Comparative Study. *Proc. of 7<sup>th</sup> RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and of the 1<sup>st</sup> RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials*, Paris, from the 1<sup>st</sup> to the 6<sup>th</sup> of September.
- [14] Boggio, A.J. (2007). Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland, Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, Brasil, pp. 71-87.
- [15] Malvar, L.J.; Cline, G.D.; Burke, D.F.; Rollings, R.; Sherman, T.W.; Greene, J.L. (2002). Alkali-Silica Reaction Mitigation: state of the art and recommendations. *ACI Materials Journal*, Vol. 99, N. 5, pp. 480-489.
- [16] NBR 5738. 2003, Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, ABNT. Rio de Janeiro, Brazil.
- [17] Igarashi, S-I. (2013). Relationship between electrical conductivity and spatial structure of capillary pores in cement pastes. *Proc. of 7<sup>th</sup> RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and of the 1<sup>st</sup> RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials*, Paris, from the 1<sup>st</sup> to the 6<sup>th</sup> of September.
- [18] RILEM TC 154 – EMC. (2003). Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures. *Materials and Structures*, Vol. 36, pp. 461-471.
- [19] CEB Bulletin d’information N. 192. (1989). Diagnosis and Assessment of Concrete Structures – State of the Art Report. Lausanne, January.
- [20] ASTM C1202. (1997). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- [21] RILEM TC 56 – MHM. (1988). Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*, Vol. 21, pp. 453-455.
- [22] Craeye, B.; Van Itterbeeck, P.; Desnerck, P.; Boel, V.; De Schutter, G. (2013). Survey on the modulus of elasticity and the tensile strength of SCC. *Proc. of Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Illinois, USA, May 12-15.
- [23] BRE. (1982). The durability of steel in concrete: part 1 – mechanism of protection and corrosion. *Materials and Structures*, Vol. 21, pp. 453-455.
- [24] Hartmann, C.T.; Helene, P.R.L. (2003). Pillars with  $f_{ck} = 115$  MPa: world record in high performance concrete. *International Construlink Magazine*, Lisboa, Vol. 1, N. 4, pp. 23-31.
- [25] Monteiro, E.C.B. (1996). Study of the capacity of Brazilian cements in relation to corrosion of reinforcement in the joint action of CO<sub>2</sub> and chloride ions (in Portuguese), Dissertação de Mestrado, UNB, Brasília, Brasil, pp. 132.