

ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

ANALYSIS OF CHLORIDE PENETRATION IN SELF-COMPACTING CONCRETES WITH LOW CONSUMPTION OF CEMENT

Lucas da Silva Barboza¹
Eliane Janoelo Ramos²

Resumo: Atualmente, a durabilidade das estruturas pode ser avaliada por meio de inspeções visuais, ensaios laboratoriais ou in loco. Para avaliar a penetração de agentes agressivos no interior do concreto existem métodos colorimétricos, os quais são visuais e possuem baixo custo e fácil aplicação. Esta pesquisa tem como objetivo analisar a penetração de íons cloreto no Concreto Autoadensável com Baixo Consumo de Cimento (CAABCC), o qual possui um consumo de cimento 17% menor em comparação ao Concreto Autoadensável de Referência (CAAR). Para análise, os corpos de prova foram submersos em uma solução de cloreto de sódio a 3,0% e nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias foram rompidos à tração por compressão diametral e na superfície dos concretos foi aspergida uma solução de nitrato de prata, método colorimétrico no qual diferencia as regiões com e sem presença de cloretos. O CAABCC apresentou um melhor desempenho quanto a resistência aos íons cloretos em comparação com o CAAR, tendo um diferencial de 32% nas idades de 28 e 90 dias.

Palavras-chaves: íons cloretos, Concreto Autoadensável, Durabilidade, Resistência.

Abstract: Currently, the durability of the structures can be assessed through visual inspections, laboratory tests or on site. To assess the penetration of aggressive agents into the concrete, there are colorimetric methods, which are visual and have low cost and easy application. This research aims to analyze the penetration of chloride ions in the Self-compacting Concrete with Low Cement Consumption (CAABCC), which has a 17% lower cement consumption compared to the Self-compacting Concrete Reference (CAAR). For analysis, the specimens were submerged in a solution of sodium chloride at 3.0% and at the ages of 3, 7, 28 and 90 days were broken by traction by diametrical compression and on the surface of the concretes a solution of silver nitrate, colorimetric method in which it differentiates the regions with and without the presence of chlorides. CAABCC showed a better performance in terms of resistance to chloride ions compared to CAAR, with a difference of 32% at the ages of 28 and 90 days.

Keywords: Chloride ions, Self-compacting Concrete, Durability, Strength.

1 Introdução

Na Construção Civil, o Concreto Convencional (CC) associa-se a armaduras formando o concreto armado, sendo este o principal recurso escolhido como elemento estrutural em edificações e obras de infraestrutura. Segundo Mehta e Monteiro (2014), isso acontece devido os seus componentes serem relativamente baratos e acessíveis na maior parte do mundo. Esse material é um dos compósitos mais antigos, e sua grande utilização se deve a vantagem de possuir excelentes propriedades mecânicas, unindo a elevada resistência à compressão do concreto com a resistência à tração do aço (FREIRE, 2005).

Esse é um dos motivos do concreto ter se tornado o material de construção mais consumido no mundo. No entanto, o aprimoramento de práticas construtivas não acompanhou a crescente demanda, ocasionando seguidos descuidos nas obras, reduzindo assim a capacidade resistente do concreto, provocando o surgimento de manifestações patológicas nas estruturas (LAPA, 2008). Segundo Fagury (2002), a maior parte das manifestações patológicas são derivadas da fase de execução, isso ocorre devido a erros de interpretação de projetos, mão de obra desqualificada, curas deficientes e outros fatores. Sabe-se que no Brasil, aproximadamente 52% das manifestações patológicas presentes nas estruturas são decorrentes da execução.

De acordo com Neville (2016), o concreto armado devido a sua resistência mecânica, foi admitido como um material de durabilidade ilimitada. Sendo assim, até o final dos anos 80, a resistência à compressão, era praticamente o único parâmetro adotado para avaliar a qualidade do concreto, na premissa de que um concreto resistente era um concreto durável. Contudo, vida útil indefinida não significa durabilidade, muito menos suportar qualquer tipo de ação sobre o concreto (FERREIRA, 2000). Neville (2016) também afirmou que sempre se deu maior importância à resistência do concreto, porém, atualmente tanto resistência quanto durabilidade devem ser consideradas ainda na fase de projeto e garantidas na hora da execução.

A durabilidade de um material pode ser entendida como o tempo que o mesmo poderá ser utilizado antes de tornar-se impróprio para o uso ao qual se destina (BARBOZA, 2018). A ACI Committee 201 (2008), define como sendo a capacidade de resistir ao intemperismo, ataque químico ou qualquer fator destrutivo. Ainda conforme a NBR 15575-1:2013 (ABNT, 2013), durabilidade é a capacidade do edifício e seus componentes de desempenhar as funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas, até o estado limite de utilização. Para Soares (2006), um concreto durável é aquele que preserva sua forma, qualidade e capacidade de uso originais após ser submetido ao ambiente no qual foi projetado.

Neville (2016) afirmou que uma durabilidade inadequada no concreto pode ser provocada tanto por agentes externos quanto por fatores internos, referentes ao próprio material. Contudo a deterioração do concreto na maioria das vezes é resultado da combinação desses agentes, são processos complexos, determinados por propriedades físico-químicas do concreto e da maneira com que foram expostos. Esses processos acabam alterando a capacidade do material desempenhar as suas funções e nem sempre podem ser vistas visualmente (LAPA, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as reações químicas geralmente se apresentam através de efeitos físicos nocivos, como o aumento da porosidade, permeabilidade e diminuição da resistência, fissuração e destacamento. Sendo que os ataques por sulfatos, álcali-agregados e a corrosão das armaduras são os responsáveis pelo maior número de deterioração em estruturas.

De acordo com Tessari (2001) a resistência do concreto a agentes agressivos é

governada principalmente pela permeabilidade do mesmo. A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido e o tamanho dos poros e a sua continuidade determinam a permeabilidade do material.

A permeabilidade do concreto ocorre devido basicamente a composição do mesmo, sendo constituída por cimento, agregados, aditivos e água, sendo o cimento o material que mais interfere nos processos físicos e químicos, influenciando assim na durabilidade, como exemplo, a estrutura porosa do concreto e a quantidade de água (BRANDÃO, 1998). Por ser um material intrinsecamente poroso, frente a inviabilidade de preencher todos os vazios entre agregados e pasta de cimento, estes decorrentes do uso da água, na qual em quantidade superior a necessária para hidratação, ao evaporar, deixará cavidades. Estas cavidades acabam formando uma rede com o exterior na qual facilitará o transporte de gases e substâncias agressivas para o interior do concreto, este processo auxiliará na degradação do material diminuindo sua resistência e aumentando a quantidade de poros no concreto (FREIRE, 2005).

Esta facilidade de transporte de gases, líquidos de ingressar na estrutura e se deslocar no interior, provocarão também a entrada de agentes, como sulfatos, íons cloretos e CO_2 , os quais influenciam na corrosão das armaduras e carbonatação do concreto (BARROS, 2008).

Dentre esses fluidos especial atenção deve ser dada ao ataque por íons cloretos, já que seu principal dano é a corrosão do aço. Para que ocorra a corrosão da armadura ou do concreto é necessário que o material esteja exposto a presença de cloretos ou que tenha ocorrido a carbonatação do concreto (BARROS, 2008).

De maneira geral, as edificações podem ser expostas de diferentes formas aos íons cloreto, sendo totalmente imersas em águas marinhas, sujeitas aos respingos de maré, carregadas pelo vento (atmosfera litorânea), compostos fluidos, pela água de amassamento ou agregados contaminados (PELLIZZER, 2005). De acordo com a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), o ambiente marinho é reconhecidamente agressivo às estruturas, sendo inserido na classe de agressividade IV, ou seja, recomenda-se maiores cobrimentos e f_{ck} mais elevados. Este ambiente pode provocar tanto a corrosão das armaduras quanto a corrosão do concreto. Outro fator mencionado por Mehta e Monteiro (2014) é que a agressividade ambiental atualmente está maior do que no passado e, muitos recursos tecnológicos disponíveis nem sempre são utilizados nas construções.

Ainda não se sabe o tempo vida de útil dessas estruturas, após o ataque por esses agentes e apesar do crescente estudo ainda não possui um consenso em meio técnico (BERENGUER *et al.*, 2018).

Diante disso, misturas de concretos tem surgido na tentativa de suprir as deficiências apresentadas pelos concretos convencionais e atender aos requisitos quanto a permeabilidade do concreto, a qual interfere na sua durabilidade e resistência (BARBOZA, 2016). Entretanto esses fatores geralmente estão associados a um alto consumo de cimento, que leva a outra problemática, a sustentabilidade, já que para a produção de 1t de clínquer é emitido aproximadamente 1t de CO_2 na atmosfera (LIMA, 2010).

Neste cenário surge o CAABCC, Concreto Autoadensável com Baixo Consumo de Cimento, sendo produzido com a combinação de materiais comuns aos do concreto convencional com a adição de dois componentes: adições minerais e aditivos químicos. Essas adições constroem uma microestrutura mais compacta após a cura, tornando o concreto menos poroso e pouco permeável, dificultando a entrada de agentes agressivos (BARBOZA, 2016).

Além disso o CAABCC, apresenta alta fluidez e estabilidade na mistura proporcionando assim, propriedades como preenchimento de vazios, capacidade de vencer obstáculos e resistência à segregação. Como consequência proporciona uma resistência à compressão elevada, melhor qualidade e durabilidade (BARBOZA, 2018).

No entanto, existem poucos estudos quanto a durabilidade desse concreto frente a

ambientes agressivos, por isso o presente estudo tem como objetivo analisar a penetração de íons cloreto no interior de concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento (CAABCC). Para isto foi utilizada o método colorimétrico, na qual é aspergida uma solução de Nitrato de Prata, sobre a superfície do concreto após ele ser submetido ao ataque por íons cloretos.

2 Materiais e procedimento experimental

Este estudo está dividido em duas etapas: a primeira revisão bibliográfica e a segunda ensaios experimentais. Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizado o Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do Centro Universitário Adventista de São Paulo, Campus Engenheiro Coelho – UNASP-EC, nesta etapa foram empreendidos os ensaios de caracterização dos materiais, moldagem dos corpos de prova, submissão dos corpos de prova ao ataque de íons cloretos, ensaios de resistência à tração por compressão diametral e compressão simples. Os agregados e o cimento utilizados na pesquisa são comercializados na região metropolitana de Campinas/SP.

2.1 Caracterização dos Materiais

É apresentado na Tabela 1 as principais características dos agregados utilizados na produção dos concretos. A caracterização dos materiais seguiu as exigências apresentadas nas normas vigentes: composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura NM 248:2003 (ABNT, 2003); classificação granulométrica NBR 7211:2019 (ABNT, 2019); massa unitária no estado solto e estado compactado seco e índice de vazios NBR NM 45: 2006 (ABNT, 2006); massa específica NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009) e NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009).

Na produção dos concretos usou-se apenas um tipo de cimento: CP II Z 32, produzido pela Votorantim S/A. A escolha dessa classificação deve-se ao fato de ser um cimento frequentemente utilizado nas edificações da região, Engenheiro Coelho/SP. Na Tabela 2 estão as principais características físicas, químicas e mecânicas do cimento.

Para fabricação dos mesmos também utilizou-se duas adições minerais, a sílica ativa e o filler calcário. A sílica ativa, proveniente do processo de fabricação do ferro silício ou silício metálico, possui massa específica de 2,22 g/cm³, superfície específica (BET) de aproximadamente 19000 m²/kg, teor de SiO₂ > 90%, retenção na peneira #325 (abertura de 45 µm) inferior a 10% e um formato de partícula esférico, essas características são apresentadas na sílica ativa da fabricante TECNOSIL.

Tabela 1 – Caracterização dos agregados miúdos e gráudo

DMC (mm)	Módulo de Finura	Classificação	Massa Específica seca (g/cm ³)	Massa Específica solta (g/cm ³)	Massa unitária compactada seca (g/cm ³)	Índice de Vazios (%)
0,30	0,92	Fina	2,54	2,56	1,47	44,22
6,30	5,23	4,75/12,50	2,76	2,89	1,50	45,61

DMC: Dimensão máxima característica.

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 2 - Propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento CII Z 32

Parâmetros	Valores
#325	3%
Superfície Blaine	4595 (cm ² /g)
Tempo de pega	120 min
Resistência à compressão	32
Coloração	Clara
Teor de Clínquer	94%

Fonte: Votorantim, 2019.

O fíler, segunda adição, originário de rochas sedimentares de calcário, possui coloração cinza, compacto e de granulação fina. O fabricante Brasil Minas fornece os seguintes dados das características químicas do material: 55,17% de CaO, 0,13% de MgO, 0,07% de Fe₂O₃, 0,30% de Al₂O₃ e 0,77% de SiO₂ (BRASIL MINAS, 2019).

O aditivo utilizado na pesquisa foi o *ADVATM Cast 525* (GRACE, 2019) a base de policarboxilato, o qual proporciona alta trabalhabilidade, sem causar segregação ao concreto, formulado especificamente para a produção de concretos autoadensáveis. Conforme o fabricante, garante alta resistência inicial e final, alta fluidez, autonivelção, aderência à armadura, alta densidade e baixa permeabilidade, tem densidade média de 1,06g/cm³ e apresenta-se na cor alaranjada.

2.2 Dosagem do concreto

Para o desenvolvimento das dosagens foi adotada a pesquisa de Barboza (2018), na qual podem ser determinadas por meio de três etapas: pasta, agregado (esqueleto granular) e concreto. Sendo a pasta constituída por cimento, sílica ativa, fíler, água e superplastificante, enquanto o esqueleto granular é composto por agregado miúdo e graúdo. Através destas etapas é possível otimizar a quantidade de materiais e garantir uma trabalhabilidade adequada.

Para melhor identificação dos concretos foram adotadas algumas siglas para as dosagens, sendo, CAAR (Concreto Autoadensável de Referência) e CAABCC (Concreto Autoadensável com Baixo Consumo de Cimento).

A definição e o método utilizado para alcançar o CAABCC foi o de Barboza (2018), o qual caracteriza o concreto com baixo consumo de cimento, aqueles que apresentam baixa relação consumo/resistência em comparação a outros concretos. O consumo de cimento utilizado nesta pesquisa foi de 434,06kg/m³ para o CAAR e de 325,54 kg/m³ para o CAABCC, tendo como um total de volume de pasta de 30% para o CAABCC. Os requisitos mínimos para elaboração dos concretos estão de acordo com as exigências da NBR 12655:2015 (ABNT, 2015) e de acordo com as exigências da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), na qual admite um consumo mínimo de cimento que varia de 260 a 360 kg/m³. A Tabela 3 apresenta as dosagens obtidas a partir dos consumos em kg/m³ de cada material, adotando-se um f_{ck} de 35 MPa tanto para o concreto de referência (CAAR) quanto para o concreto com baixo consumo de cimento (CAABCC).

Tabela 3 - Consumos de materiais (kg/m³) para a produção dos concretos

Material	CAAR	CAABCC
Cimento (kg)	434,06	358,10
Fíler Calcário (kg)	173,62	143,24
Sílica Ativa (kg)	43,41	35,81
Areia (kg)	648,70	724,39
Brita (kg)	973,06	1086,56
SP(kg)	8,68	14,97
Água (kg)	173,62	143,24
Água p/ agregados (%)	58,00	65,00
Volume de pasta (%)	40,00	33,00

Fonte: Autores, 2020.

2.3 Produção do concreto

Para a mistura dos concretos foi utilizada uma betoneira no modelo por gravidade com capacidade de mistura de 420 litros, no qual obtém-se os concretos num tempo total de 270 segundos, seguindo a sequência abaixo:

- Adiciona-se o agregado graúdo mais $\frac{3}{4}$ da água total e mistura-se por 30 segundos;
- Adiciona-se o cimento, sílica ativa, fíler calcário, superplastificante e o restante da água e mistura-se por mais 120 segundos;
- Adiciona-se o agregado miúdo e mistura por mais 120 segundos.

Se necessário após a finalização da mistura poderiam ser feitos ajustes nos materiais para alcançar a trabalhabilidade adequada, contudo não foi necessário para as dosagens escolhidas.

Para que a mistura possa ser considerada como concreto autoadensável é necessário que este passe por verificações no seu estado fresco. Estas são determinadas pela NBR 15823: 2017 (ABNT, 2017), e são apresentados na Tabela 4, tanto para o CAAR quanto para o CAABCC.

Tabela 4 - Caracterização do concreto autoadensável no estado fresco

Propriedades	Limites	CAAR	CAABCC
Slump-flow, df (mm)	$550 \leq df \leq 850$	810	740
T500 (s)	$>2''$	2''95	6''31
Caixa L, h2/h1*	$\geq 0,80$	0,97	0,96
Caixa L, t20 (s)	---	1''55	2''25
Caixa L, t 40(s)	---	4''49	10''73
Funil V, tv (s)	$8 \leq tv \leq 25$	8''	16''84

*Foram utilizados 4φ12,5 mm espaçados de 3,2 cm.

Fonte: Autores, 2020.

2.4 Programa Experimental

Nesta pesquisa, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, sendo que os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados para a verificação do f_{ck} adotado de 35MPa e também

como referência, pois de acordo com Cavalcanti (2006) o ensaio de tração deve representar de 7 a 10% da resistência à compressão. A parte prática do trabalho está dividida em duas etapas, na primeira foram moldados os corpos de prova do CAAR e do CAABCC e na segunda etapa os corpos de prova foram colocados dentro de um tanque para serem submetidos ao ataque constante de íons cloreto e foram ensaiados nas idades determinadas.

Ao todo foram moldados 30 corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 10 cm x 20 cm de altura, sendo que 15 são referentes ao CAAR e 15 ao CAABCC, a moldagem foi realizada conforme a NBR 5738:2015 (ABNT, 2015). Destas 15 amostras, 3 foram separadas para ensaio de resistência à compressão simples e as restantes (12), foram submetidas a ensaios de resistência à tração por compressão diametral. A Tabela 5 apresenta a quantidade de corpos de prova separados para cada idade e ensaio.

Tabela 5- Quantidade dos corpos de prova para cada idade e ensaio de resistência

Ensaio de Resistência	Concretos analisados		
	Idades	CAAR	CAABCC
Resistência à compressão	28*	3	3
Resistência à tração por compressão diametral	3	3	3
	7	3	3
	28	3	3
	90	3	3
Total de amostras	-	15	15

*Idade referente aos 28 dias após a cura por imersão.

Fonte: Autores, 2020.

A mistura dos concretos CAAR e CAABCC foram realizadas no mesmo dia, após a mistura os corpos de prova moldados foram submetidos a cura por imersão até aos 28 dias de idade. Após a cura, separou-se 6 corpos de prova, sendo 3 do CAAR e 3 do CAABCC, os quais foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, conforme NBR 5739:2018 (ABNT, 2018), para assim obter a média do f_{ck} alcançado pelas dosagens determinadas na pesquisa. Dessa forma restaram 24 corpos de prova os quais foram devidamente identificados e então submetidos ao ataque de íons cloreto.

Para simular o ataque por íons cloreto, o qual agride inúmeras estruturas de concreto nas regiões litorâneas ou estruturas submersas, consequência da presença da solução na água do mar e da própria ação do vento, foi utilizada uma caixa d' água de 500L, na qual foi preenchida com água até aproximadamente metade da altura dos corpos de prova. Esta escolha se justifica pelo fato de que as áreas com respingos de maré são as regiões mais afetadas por íons cloreto. Dessa forma tentou-se simular essa região, deixando os corpos de prova submersos numa altura de aproximadamente 10 cm, Figura 1.

Para tornar a água salina, foi utilizado o Cloreto de Sódio, e de acordo com o volume de água apresentado de aproximadamente 52L, foram colocados 1,56kg de cloreto de sódio, concentrando assim uma porcentagem de 3%, segundo Peinado *et al.* (2018) concentração média de sal na água do mar.

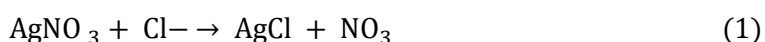
Os corpos de prova ficaram submersos até metade da sua altura na água salina até as idades especificadas, sendo que para cada idade foram retirados 3 corpos de prova de cada tipo de concreto.

Antes da realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral os corpos de prova ficaram secando no ambiente do laboratório para facilitar a observação das regiões com presença de íons cloreto e também para delimitar a região imersa na solução e a

que ficou exposta a atmosfera. Depois desse procedimento realizou-se o ensaio de tração por compressão diametral, conforme a NBR 7222:2011 (ABNT,2011). Após a ruptura, resultaram-se 12 metades, separadas nas duas categorias de concreto e então realizada a análise da profundidade de penetração dos cloretos.

Para a análise da penetração dos cloretos foi aspergida uma solução de Nitrato de Prata (AgNO_3), com 0,1M, sobre a superfície exposta dos CP's, após 10 minutos de repouso, para que ocorresse a reação da solução, eram evidenciadas as zonas em que havia a penetração de cloretos. A aspersão de nitrato de prata resulta em cloreto de prata, na presença de cloretos livres e o óxido de prata, na ausência de cloretos, resultando em colorações superficiais contrastantes geralmente esbranquiçada com contaminação e escura sem contaminação, conforme se observa na Figura 2.

De acordo com Silva (2006) esta reação entre íons cloreto do concreto e a solução de Nitrato de Prata, pode ser descrita como:



Depois da aspersão com auxílio de um paquímetro, foram coletadas dez medidas de cada lateral (direita e esquerda) de cada metade dos corpos de prova, totalizando 40 medidas de penetração dos cloretos por corpo de prova e por idade.

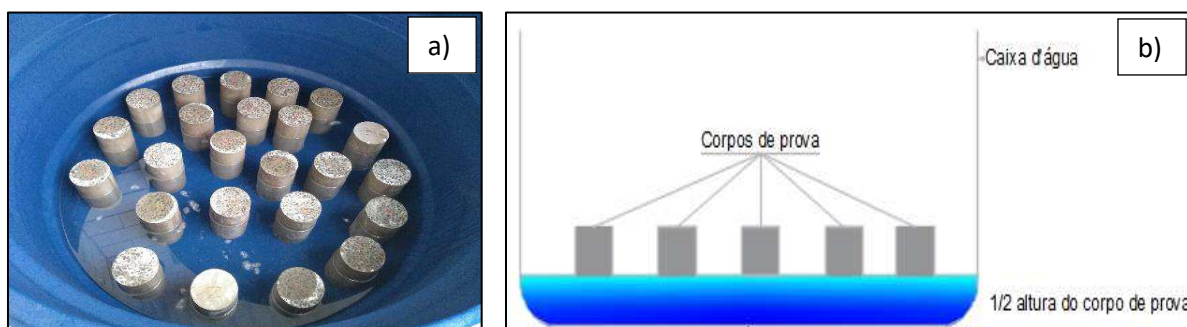


Figura 1- Imersão dos corpos de prova em solução de Cloreto de Sódio – a) Condição real e b) Ilustração dos corpos de prova submersos em solução de cloreto

Fonte: Autores, 2020.

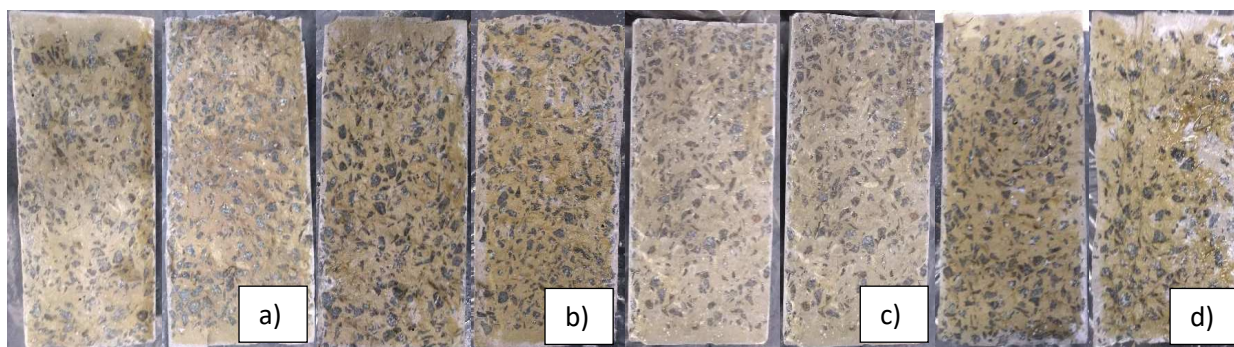


Figura 2-Corpos de prova após ruptura sob efeito da solução de Nitrato de Prata (CAABCC) – a) 3, b) 7, c) 28 e d) 91 dias.

Fonte: Autores, 2020.

3 Resultados

Na Tabela 6, apresentam-se os resultados obtidos através dos ensaios de resistência à compressão simples sendo que esses ensaios foram realizados após os 28 dias de cura por imersão.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, esses ensaios foram realizados após a imersão dos corpos de prova em solução de cloreto de sódio e ensaiados nas idades especificadas na Tabela 4.

Na Tabela 8, apresenta-se o nível de penetração média dos cloretos nos corpos de prova de acordo com as idades e concreto, e na Figura 3 estão descritos todos resultados de todas as medidas tiradas de cada ensaio e idade.

Tabela 6 - Resistência à compressão simples aos 28 dias CAAR e CAABCC

CP	CAAR		CAABCC	
	CARGA (Kgf)	Tensão (MPa)	CARGA (Kgf)	Tensão (MPa)
1	70862	88,50	72287	90,30
2	72394	90,40	78521	98,00
3	74865	93,50	72686	90,80
$\bar{\chi}$ (MPa)	72707	90,80	74498	93,00

$\bar{\chi}$ = Média aritmética

Fonte: Autores, 2020.

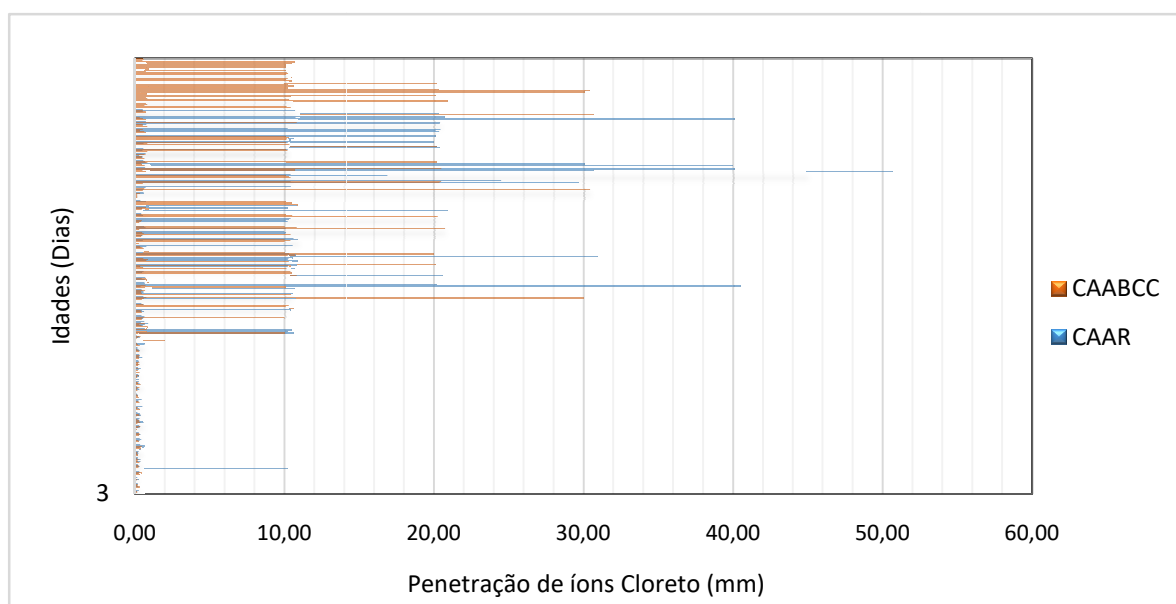
Tabela 7- Resistência à tração por compressão diametral após imersão em cloretos CAAR e CAABCC

Idades	CAAR				CAABCC			
	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	$\bar{\chi}$ (MPa)	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	CP3 (MPa)	$\bar{\chi}$ (MPa)
3	5,28	5,70	5,89	5,62	5,45	4,06	3,47	4,33
7	6,20	6,31	5,00	5,92	6,39	4,77	5,72	5,67
28	6,70	6,69	6,31	6,57	7,54	5,62	6,23	6,47
90	6,03	5,78	5,41	5,74	6,11	5,99	3,89	5,33
$\bar{\chi}$ = Média aritmética								

Fonte: Autor, 2019

Tabela 8- Penetração média de cloretos para diferentes idades no CAAR e CAABCC (cm)

Idades	CAAR			CAABCC		
	CP1 (cm)	CP2 (cm)	CP3 (cm)	CP1 (cm)	CP2 (cm)	CP3 (cm)
3	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
7	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
28	0,28	0,85	0,44	0,31	0,59	0,42
90	1,35	PERDIDO	1,13	0,59	0,55	0,91



Fonte: Autores, 2020.

4 Análises de resultados

Através dos resultados demonstrados na seção 3, Tabela 6, pode-se perceber que tanto o CAAR quanto o CAABCC apresentaram valores superiores ao adotado como resistência mínima, sendo o valor adotado de 35MPa aos 28 dias, os dois concretos apresentaram uma média de 3 vezes mais de resistência inicial adotada.

Na Tabela 7 apresentam-se os resultados de resistência à tração por compressão diametral, percebe-se uma variação das resistências dos corpos de prova de mesma idade e que até os 28 dias apresentaram um crescimento na resistência enquanto que após os 28 dias houve um decréscimo nos dois concretos moldados, sendo que o terceiro corpo de prova do CAABCC aos 90 dias, foi o que apresentou o menor valor de resistência.

De acordo com Helene (1997), a concentração de cloretos dentro do concreto não reduz a capacidade resistente do mesmo e nem altera o aspecto superficial, apesar dessa afirmação é possível observar que a partir dos 28 dias a resistência à tração dos concretos diminuíram em comparação com as outras idades, sendo este um fator a ser observado em próximos trabalhos.

A Tabela 8 indica os valores de infiltração nos CP's estes são as médias das 40 medidas retiradas de cada corpo de prova em cada idade e nas duas categorias de concreto, já os valores de cada penetração estão representados no Gráfico 1. Nas idades iniciais de 3 e 7 dias observa-se que a penetração foi pequena sendo de 0,03 cm para o CAABCC e 0,06cm para o CAAR, nas idades de 28 e 90 dias a infiltração ocorreu de maneira mais agressiva chegando a 1,35cm para o CAAR e a 0,91 cm para o CAABCC, como esperado um aumento de infiltração com o passar das idades.

Como já mencionado estes valores são as médias das infiltrações, por isso como indicado na Figura 3, aos 90 dias os corpos de prova do CAAR apresentaram valores de penetração superiores a 4 cm, enquanto os corpos de prova do CAABCC indicaram valores abaixo de 3 cm. De acordo com a NBR 6118:2014 (ABNT,2014), os corpos de prova do concreto de referência já apresentariam riscos a estrutura e a armadura, pois a infiltração encontra-se próximo aos limites de cobrimento propostos pela norma, conforme apresentado

na Tabela 9. Na Figura 2 é possível observar o crescimento da penetração dos cloretos.

Tabela 9 - Cobrimentos mínimos NBR 6118: 2014

Tipo de Estrutura	Componente ou Elemento	Classe de Agressividade Ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento Nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	³ 5	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto Protendido	Todos	30	35	45	55

Fonte:ABNT NBR 6118:2014.

Apesar do crescimento da penetração em todas as idades, o CAABCC apresentou o melhor desempenho frente a proteção contra os íons cloretos, indicando uma diminuição do percentual de aproximadamente 32% em relação ao CAAR. O CAABCC em nenhuma das idades atingiu o cobrimento mínimo exigido pela norma de 45-50mm, mantendo a armadura protegida da corrosão.

Um fator observado após os 28 dias de imersão dos corpos de prova na solução de cloreto de sódio foi a formação de cristais de sais na região exposta, Figura 4. Segundo Pereira e Cincotto (2001), esse fenômeno é mais recorrente em regiões que apresentam os ciclos de umedecimento e secagem, respingos de maré, ou pela névoa salina. De acordo com Neville (2016), quando as condições externas são mais secas, a água pura evapora, permanecendo os sais cristalizados nos poros do concreto. Aumenta assim a concentração salina na superfície do concreto, essa concentração promove um deslocamento do sal, da região mais concentrada para a menor, ou seja o interior do material, esse ciclo é contínuo sendo que a concentração diminui com a distância da superfície, ou seja, regiões totalmente submersas sofrem menos a ação dos íons cloretos.



Figura 4- Cristalização de sais na superfície exposta do corpo de prova

Fonte: Autor, 2019

Esse fato foi observado no presente estudo nos momentos de aspersão de Nitrato de prata, nos quais as regiões que estavam expostas a atmosfera apresentavam os maiores níveis de infiltração. Pereira e Cincotto (2001) afirmam que diversos fatores interferem a migração e absorção desses íons ao concreto, contudo pode-se citar que os fatores relevantes são: diâmetro dos capilares do concreto, os quais são variáveis em função do tempo, grau de hidratação do cimento, composição química do cimento, adições e relação água/cimento.

Outro fator que influencia a fixação de cloretos no concreto é a composição química do cimento, na qual pode auxiliar e iniciar o processo corrosivo nas armaduras, pois a quantidade dos compostos C^3A e C^4AF e a formação do C-S-H ao combinarem-se com os cloretos no processo de hidratação podem aumentar ou diminuir o fluxo de penetração dos íons. Por isso a escolha do cimento utilizado e as misturas no processo de produção dos concretos interferem diretamente na durabilidade do material (PELLIZZER, 2015).

O segundo corpo de prova do CAAR aos 90 dias sofreu uma ruptura brusca, deformando muito o material não sendo possível analisar a penetração dos íons cloretos.

De acordo com Jucá (2002), o método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata é um dos métodos mais simples para verificação da penetração de íons cloretos, por isso em estruturas expostas a ambientes marinhos e ao CO_2 recomenda-se que associem outros ensaios ao método.

5 Conclusão

Por meio dos resultados obtidos pelo método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata, foi possível identificar um desempenho satisfatório do CAABCC quanto a proteção da penetração de íons cloreto no interior do concreto. Esse desempenho pode melhorar com a utilização de materiais impermeabilizantes, os quais poderão barrar de maneira mais eficiente a infiltração dos íons cloretos.

O CAABCC apresentou-se também como uma alternativa sustentável, com boas resistências mecânicas, atendendo as exigências normativas quanto a concretos autoadensáveis.

O concreto com baixo consumo de cimento apresentou os menores níveis de penetração de cloretos comparados com o CAAR, isso pode ser justificado pela melhora na dosagem, na qual definiu-se um esqueleto granular maior e uma redução do volume de pasta de 7% em relação ao concreto de referência, resultando em um concreto menos poroso, ou seja, maior resistência a agentes agressivos.

Dessa forma pode-se concluir que os resultados desta pesquisa foram satisfatórios comprovando o bom desempenho do CAABCC quanto a resistência aos íons cloretos garantindo a durabilidade do concreto e também sua vida útil.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 201. **ACI 201 .2R**: guide to durable concrete. FarmingtonHills.Michigan-USA, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823**: Concreto Auto - adensável. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 7222**: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

_____. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BARBOZA, L.Da S. **Estudo sobre o impacto da redução do consumo de cimento no comportamento mecânico do concreto autoadensável**. 2016. 176f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

BARBOZA, L.Da S. **Produção de concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e sua influência na aderência aço-concreto**. 2018. 263f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

BARROS, P.G.Dos S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto autoadensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. 2008. 121f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal Alagoas, Maceió, 2008.

BERENGUER,R.; PASSOS,A.;
MONTEIRO,E.C.B.;HELENE,P.;JUST,A.;OLIVEIRA,R.;MEDEIROS,M.; ARNEIRO,A.
Verificação de penetração de cloretos em corpos de prova parcialmente imersos em água do mar em Recife, Pernambuco. Revista de laAsociaciónLatinoamericana de Control de

Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. v.8, n.2, p. 108 -122, maio-agosto. 2018.

BRANDÃO, A.M.Da S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado**. 1998, 150f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas - Univesidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BRASIL MINAS (2019). Pó de calcário. Disponível em: <http://www.brasilminas.net/calcario>. Acessado em maio de 2019.

CAVALCANTI, D.J De Holanda. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 140f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

FAGURY, S.C. **Concretos e Pastas de Elevado Desempenho: Contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concreto novo e velho, com tratamento da zona de interface**. 2002. 187f. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FERREIRA, R.M. **Avalliação de ensaios de durabilidade do betão**. 2000. 246f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade do Minho, Guimarães, 2000.

FREIRE, K.R.R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. 2005. 211f. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GRACE (2019). *ADVATMCAST 525*- Superplastificante. Ficha técnica do produto. Disponível em: https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf. Acessado em maio de 2019.

HELENE, P.R.L. **Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto**. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/biblioteca-phd/publicacoes/em-revistas/>. Acessado em junho de 2019.

JUCÁ, T. R. P. **Avaliação de cloretos livres em concretos e argamassas de cimento Portland pelo método de aspersão de solução de nitrato de prata**. 2002. 122f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2002.

LAPA, J.S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56f. Monografia de Pós-Graduação em Construção Civil – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LIMA, J.A.R.De. **Avaliação das consequências da produção de concretos no Brasil para as mudanças climáticas**. 2010. 151f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2014). **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2.ed. São Paulo: IBRACON.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Tradução de Paulo Helene et al. 1. ed. São Paulo, PINI, 1994. 580p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman. 2016.

PEINADO, H.S.;VANDERLEI,R.D.;PIETROBON, M. **Análise da penetração de cloretos em concreto autoadensável com cinza do bagaço da cana de açúcar, sílica, filer calcário**. Revista de Engenharia e Tecnologia. V.10, n.2, p. 206. agosto 2018.

PEREIRA,L.De F. L. Da C.;CINCOTTO, M.A. **Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: Influência do tipo de cimento**. 2001.128f. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PELLIZZER, G.P. **Análise mecânica e probabilística da corrosão de armaduras de estruturas de concreto armado submetidas à penetração de cloretos**. 2005. 247f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SILVA, F.G. Da. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 236f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SOARES, J.C. **Aço-concreto geopolimérico: correlação entre tensão de aderência e comprimento de ancoragem**. 2006. 124f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Campo dos Goytacazes, 2006.

TECNOSIL (2019). **Sílica Ativa**. Ficha técnica do produto. Disponível em: <http://www.tecnosilbr.com.br/produtos/>. Acessado em maio de 2019.

TESSARI, R. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação de íons cloreto**. 2001. 114f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

VOTORANTIM (2019). **Cimento CP II Z32**. Ficha técnica do produto. Disponível em: <http://www.votorantimcimentos.com.br/hotsites/cimento/base.htm>. Acessado em maio de 2019.