

Combate à ação sinérgica da carbonatação e do ataque por cloretos com adição de CBCA

Combat the synergistic action of carbonation and attack by chloride with the addition of SCBA

DOI:10.34117/bjdv7n10-245

Recebimento dos originais: 19/09/2021

Aceitação para publicação: 19/10/2021

Bernardo Inojosa Lyra

Graduado em Engenharia Civil;

Instituição: Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco;

Endereço: Rua Benfica, 455 – Madalena, Recife-PE. CEP: 50720-001;

E-mail: bernardo.lyra17@gmail.com

Eliana Cristina Barreto Monteiro

Doutora em Engenharia Civil;

Instituição: Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco e

Universidade Católica de Pernambuco;

Endereço: Rua Benfica, 455 – Madalena, Recife-PE. CEP: 50720-001;

E-mail: eliana@poli.br

RESUMO

Esse trabalho buscou avaliar o desempenho da CBCA frente à ação conjunta da carbonatação e do ataque de cloretos. Para isso, foram confeccionadas argamassas com teor de CBCA de 0% e 15% em substituição ao cimento, sendo que apenas metade das argamassas, com e sem CBCA, passaram pelo processo de cura durante 28 dias, totalizando 4 séries. Foram analisadas a absorção, a resistência à tração e a espessura da frente de carbonatação e dos íons cloreto dos corpos de prova. Realizando-se os ensaios, foi possível concluir que a série com 15% de CBCA e que passou pelo processo de cura foi a que obteve um melhor desempenho, tendo uma menor absorção por capilaridade e menor profundidade dos íons de cloreto livre. A resistência apresentou uma leve redução, enquanto a espessura da frente de carbonatação piorou devido ao uso da CBCA.

Palavras-chave: Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar, Corrosão, Carbonatação, Cloretos.

ABSTRACT

This work sought to evaluate the performance of SCBA against the joint action of carbonation and chloride attack. For this, mortars with SCBA percentage of 0% and 15% were made in replacement of cement, and only half of the mortars, with and without SCBA, underwent the curing process for 28 days, totaling 4 series. The absorption, resistance and thickness of the carbonation front and chloride ions of the specimens were analyzed. Performing the experiments, it was possible to conclude that the series with 15% of SCBA that went through the curing process had the best performance, having a lower absorption by capillarity and less depth of free chloride ions. The resistance showed a slight reduction, but the thick-ness of the carbonation front worsened due to the use of CBCA.

Keywords: Sugarcane Bagasse Ash, Corrosion, Carbonation, Chlorides.

1 INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras de uma estrutura em concreto armado é uma das principais e mais onerosas manifestações patológicas que atingem as edificações ao redor do mundo (CARDOSO, 2016). A durabilidade das estruturas de concreto frente a ação de tal manifestação tornou-se, desde muito tempo, foco de inúmeras pesquisas, as quais identificaram dois mecanismos principais que podem induzir a corrosão das armaduras do concreto: a ação do dióxido de carbono (CO_2) e a ação de íons de cloreto (Cl^-) (LI et al., 2019).

O ataque do dióxido de carbono (CO_2) ao concreto, a carbonatação, ocorre quando o CO_2 da atmosfera difunde-se na sua matriz e reage com os produtos da hidratação do cimento (hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$), levando a uma diminuição da alcalinidade (pH) do concreto. Quando o pH cai abaixo de 9,5, a película passivadora inicialmente formada em torno do reforço de aço começa a se decompor levando, assim, à corrosão do aço das armaduras quando a umidade e o oxigênio estão presentes (LIU et al., 2016; LIU et al., 2017; ZHANG e SHAO, 2016; WANG et al., 2017).

Os íons cloreto presentes no concreto podem ser classificados em dois estados diferentes: ligados e livres. O cloreto ligado é quimicamente combinado pelo produto da reação de materiais cimentícios, formando, por exemplo, o sal de Friedel através da ligação química do cloreto com o C_3A , ou adsorvido fisicamente pela área superficial interna da estrutura dos poros. O cloreto ligado não é solúvel na solução presente nos poros e, portanto, não tem efeito direto na corrosão do aço. O cloreto livre, no entanto, encontra-se dissolvido na solução dos poros e contribui para o aumento do potencial de corrosão (ZHANG e SHAO, 2016). Quando a concentração de íons cloreto na vizinhança da barra de aço atinge um certo valor limiar, a película protetora ao redor da barra torna-se instável e sua proteção será quebrada, levando a um estado de corrosão ativa do aço (LIU et al., 2016).

No campo, o concreto é afetado simultaneamente por vários mecanismos de degradação, possivelmente com um efeito sinérgico na deterioração (LIU et al., 2016; KUOSA et al., 2013). Quando o ataque de cloreto, por exemplo, é acompanhado de carbonatação sob ciclos de umedecimento, o risco de corrosão nas estruturas de concreto armado pode aumentar ainda mais (YE et al., 2016; ZHU et al., 2016a). Em seu estudo Zhu et al. (2016b) determinaram que a probabilidade de início da corrosão das armaduras devido a ação combinada da carbonatação e da entrada de cloreto é quase duas vezes maior do que o caso em que os dois mecanismos são considerados separadamente.

No concreto exposto à carbonatação severa, o valor do pH na solução de seus poros é reduzido, o que causa a dissolução do sal de Friedel e do gel de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H). Como resultado os íons de cloreto, antes ligados, passam a ser livres e a sua ligação química e física é enfraquecida, promovendo assim a difusão de cloretos no concreto, aumentando a quantidade de íons cloreto livre para dentro da amostra. Portanto, a carbonatação do concreto pode aumentar significativamente a concentração de cloretos livres na solução dos poros, tornando-se maior do que a difusão simples de íons cloreto da superfície para o interior (LIU et al., 2017; ZHU et al., 2016a; XIE et al., 2019; JIN et al., 2018).

O setor sucroalcooleiro vem se expandindo nos últimos anos, alavancado principalmente pelo advento da bioenergia. Contudo, a produção de açúcar, álcool e energia a partir de cana-de-açúcar pode causar problemas ambientais em decorrência da geração de resíduos como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) (FERNANDES et al., 2015). Dessa forma, a indústria da construção civil apresenta um elevado potencial para incorporação de resíduos desta natureza, como a CBCA, sob a forma de adição mineral com ação pozolânica, colaborando para o desenvolvimento tecnológico, ambiental e econômico regional (FERNANDES et al., 2015). Quando empregada em substituição na parcela de cimento Portland, a CBCA apresenta resultados satisfatórios e similares aos compósitos de referência em função do seu comportamento pozolânico, reduzindo assim o consumo de cimento necessário e consequentemente a emissão de gases nocivos na atmosfera provenientes do processo de fabricação (SANTOS et al., 2020).

Além de imprimir um caráter sustentável ao concreto, a incorporação de cinzas volantes, como a CBCA, em matrizes cimentícias tem sido frequentemente utilizada com o objetivo de tornar a matriz mais resistente à ação dos íons cloreto. A sílica (SiO_2) presente nas cinzas reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) do cimento formando estruturas do tipo C-S-H que diminuem a porosidade do concreto, diminuindo, consequentemente, o transporte de agentes agressores como, por exemplo, os íons de cloreto (Cl^-) e o dióxido de carbono (CO_2). Além disso, os aluminatos presentes nas cinzas volantes reagem quimicamente com os Cl^- fixando-os e reduzindo a quantidade de cloretos livres capazes de penetrar no concreto (LIU et al., 2016; MALHEIROS et al., 2015; MEDEIROS et al., 2017; LIMA et al., 2011; SIMCIC et al., 2015).

No entretanto, existe uma ambiguidade no uso de cinzas volantes em relação à difusão desses dois agentes agressores. A sua adição também pode favorecer o

desenvolvimento da carbonatação, devido à redução significativa do hidróxido de cálcio, que ocorre pela diminuição da quantidade de cimento na mistura, devido a sua substituição, e pelo seu consumo através da reação pozolânica proveniente desta adição (ZHANG e SHAO, 2016; XIE et al., 2019). Esses dois fatores ocasionam uma redução da alcalinidade do concreto, resultando em uma frente de carbonatação com avanço mais rápido. Conseqüentemente, visto que a carbonatação liberta parte dos cloretos fixos, a utilização de cinzas volantes pode aumentar a quantidade de cloretos livres no concreto (JIM et al., 2018; MALHEIROS et al., 2015).

Em face ao exposto, esta pesquisa vislumbra a realização de um estudo científico diante do cenário de reaproveitamento sustentável de resíduos da indústria sucroalcooleira e a busca por materiais eficazes na mitigação da ação conjunta da carbonatação e do ataque por íons de cloreto nas estruturas de concreto.

Portanto, esse trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBCA) no combate à degradação do concreto, frente à ação conjunta da carbonatação e do ataque por cloretos. Para isso, buscou-se analisar a influência da substituição parcial do cimento por CBCA na permeabilidade do concreto; avaliar o efeito da CBCA em substituição parcial do cimento frente a resistência mecânica do concreto; estudar a ação da carbonatação em relação à difusão de íons de cloreto em concretos com e sem adições pozolânicas e analisar a influência da substituição parcial do cimento Portland por CBCA, sobre a penetração de íons de cloreto e de dióxido de carbono na matriz cimentícia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CIMENTO

Como esse trabalho buscou simular as mesmas condições das estruturas de concreto da região, foi utilizado nesse experimento o Cimento Portland Composto com Filer (CP-II F 32), já que esse é um dos tipos de cimento mais utilizados. A seguir, na Tabela 1, apresenta-se as propriedades físicas e químicas do cimento utilizado, fornecida pelo fabricante.

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas do cimento utilizado.

PROPRIEDADES FÍSICAS	Material Retido na #200 (%)	1,31
	Material Retido na #350 (%)	5,39
	Blaine (cm ² /g)	3415
	Massa Específica (g/cm ³)	3,06

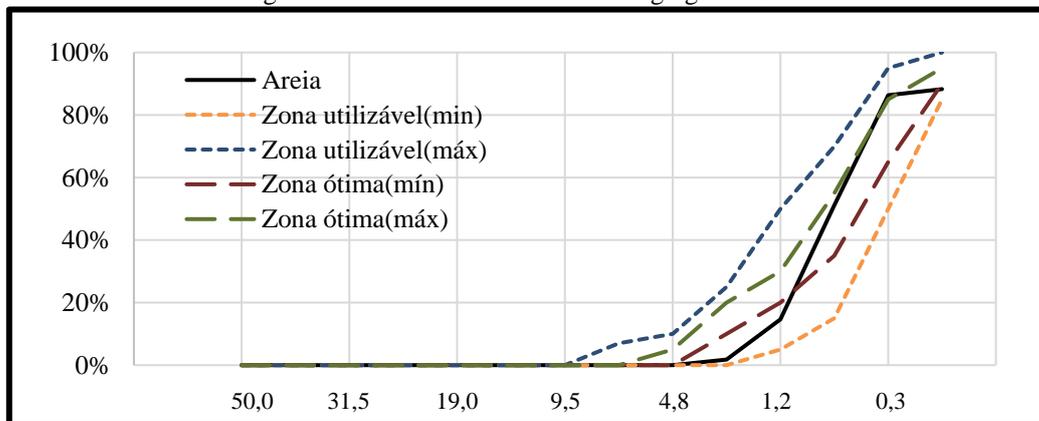
	Tempo de Pega (min)	Inicial	253
		Final	305
	Resistência à compressão (MPa)	1 Dia	15,2
		3 Dias	29,2
		7 Dias	34,8
28 Dias		40,9	
PROPRIEDADES QUÍMICAS (%)	Perda de Fogo		6,63
	CaO Livre		0,91
	Resíduo Insolúvel		1,29
	Equivalente Alcalino		0,68
	CaO		61,19
	SiO ₂		18,26
	Al ₂ O ₃		4,27
	MgO		3,01
	Fe ₂ O ₃		2,94
	SO ₃		2,51

Fonte – Autor.

2.2 AGREGADOS

Visando manter a semelhança com as estruturas de concreto, o agregado miúdo utilizado para a confecção da argamassa foi uma areia comumente utilizada para confecção de concreto, que foi comprada em um armazém da região. A areia foi seca na estufa para que a umidade existente não influenciasse no traço da argamassa. Para a caracterização do agregado realizou-se o ensaio de determinação da composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), estando o presente agregado dentro dos limites utilizáveis determinados pela NBR 7211 (ABNT, 2009). O resultado do ensaio apresenta-se na Figura 1.

Figura 1 – Curva Granulométrica do agregado miúdo.



Fonte – Autor.

2.3 CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR (CBCA)

As cinzas utilizadas na pesquisa foram fornecidas e coletadas na Usina São José, situada em Igarassu, estado de Pernambuco. O seu processamento obedeceu a três etapas: secagem, moagem e peneiração. Primeiro a cinza foi seca em estufa a 105°C até que fosse possível observar que estava completamente seca, pois a cinza vem úmida da usina. Em seguida a cinza foi processada em um moinho, pois, segundo Cordeiro et al. (2016), essa etapa acaba por aumentar a sua ação pozolânica. Por último a cinza foi peneirada utilizando a peneira #200 de abertura 0,075 mm, visando igualar a granulometria da CBCA utilizada com a do cimento.

A composição química da CBCA foi determinada através do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), que identifica os elementos químicos presentes nas amostras de forma qualitativa. Esse ensaio foi direcionado pela NBR 14656 (ABNT, 2001). A seguir, a Tabela 2 expõe as composições químicas dos óxidos da CBCA obtidos pelo FRX.

Tabela 2 – Composição química da CBCA por FRX.

Compostos	%	Compostos	%	Compostos	%
SiO ₂	60,24	TiO ₂	1,53	Cr ₂ O ₃	0,04
Al ₂ O ₃	14,38	SO ₃	1,32	SrO	0,03
Fe ₂ O ₃	6,92	Na ₂ O	0,29	V ₂ O ₅	0,02
K ₂ O	5,29	ZrO ₂	0,29	CuO	0,02
CaO	4,17	MnO	0,16	NiO	0,01
P ₂ O ₅	3,56	BaO	0,11	Rb ₂ O	0,01
MgO	1,53	ZnO	0,05	Nb ₂ O ₅	0,01

Fonte – Autor.

Examinando a Tabela 2, verifica-se que a CBCA obedece aos dois primeiros requisitos químicos para materiais pozolânicos em relação aos óxidos da NBR 12653 (ABNT, 2015). Porém esta cinza tem álcalis acima do permitido em norma, podendo causar um aumento no número do equivalente alcalino, devido a substituição do cimento Portland pela CBCA, visto que o percentual de equivalentes em Na₂O do cimento Portland é de 0,68% enquanto o da CBCA é 3,77% obtidos pela Equação 1:

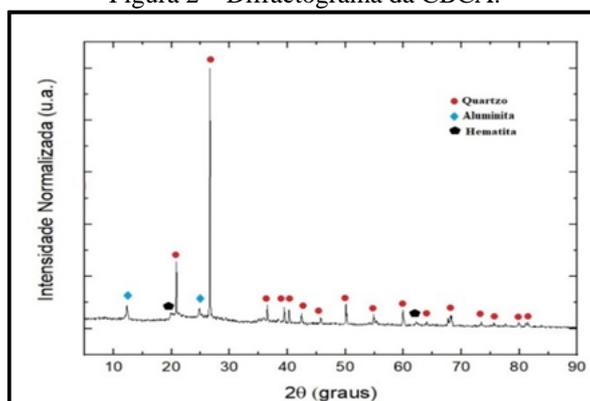
$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,658 \text{K}_2\text{O}\% + \text{Na}_2\text{O}\% \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

- Na₂O_{eq}, equivalente alcalino;
- K₂O%, percentual de óxido de potássio;
- Na₂O%, percentual de óxido de sódio.

A estrutura atômica e molecular da CBCA foi analisada através da espectrometria de difração de raios X (DRX). A Figura 2 abaixo representa o difractograma da cinza, onde pode-se observar que a cinza apresenta picos de dióxido de silício na forma de quartzo. Segundo Cordeiro et. al. (2010) a atividade pozolânica da CBCA pode ser atribuída à presença de sílica amorfa na sua composição.

Figura 2 – Difractograma da CBCA.



Fonte – Autor.

2.4 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (TRAÇO E PROCESSO)

Adotou-se para o estudo a utilização de corpos de prova de argamassa com a intenção de simular o cobrimento do concreto e também de evitar a interferência dos agregados graúdos nas leituras de espessura de frente de carbonatação e da profundidade dos íons de cloreto (CARDOSO, 2016).

Para realização da parte experimental foram confeccionados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura em argamassa, com o traço de 1:3:0,5 em massa, seguindo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019).

O programa experimental buscou avaliar quatro situações, que foram a presença de cloretos livres e da profundidade de carbonatação em quatro séries, que são:

- Corpos de prova sem substituição de cimento por CBCA e que não passaram pelo processo de cura (C-1);
- Corpos de prova com substituição de cimento por 15% de CBCA que não passaram pelo processo de cura (C-2);
- Corpos de prova sem substituição de cimento por CBCA e que passaram pelo processo de cura por imersão em água durante 28 dias (C-3);
- Corpos de prova com substituição de cimento por 15% de CBCA que passaram pelo processo de cura por imersão em água durante 28 dias (C-4).

Para isso foram confeccionados ao todo 36 corpos de prova de argamassa. Destes, metade foi submetido à cura por imersão em água durante 28 dias, com o objetivo de avaliar os seus efeitos na diminuição da permeabilidade do concreto. Tanto dos corpos de prova curados como dos não curados, 9 foram confeccionados com 15% da CBCA em substituição ao cimento e os outros 9 foram confeccionados sem CBCA em sua composição, servindo como referência. A Tabela 3 a seguir apresenta os traços em massa dos corpos de prova confeccionados para o experimento.

Tabela 3 – Traços dos corpos de prova.

ARGAMASSAS	CIMENTO (g)	AGREGADO (g)	CBCA (g)	ÁGUA (g)
0% (referência)	624,0	1872,0	–	0,312
15% (CBCA)	530,4	1872,0	93,6	0,312

Fonte – Autor.

A influência da carbonatação na entrada de cloreto é dependente de sua sequência de ocorrência. Em seu estudo Wang et al. (2017) determinaram que quando concretos carbonatados são expostos a cloretos, há uma penetração aumentada desses íons muito mais profundamente no concreto do que quando comparados aos concretos submetidos à exposição ao cloreto antes da carbonatação. Tal fato ocorre devido à possível presença de microfissuras induzidas por carbonatação na região próxima à superfície, além da ação da carbonatação que libera os íons de cloreto fixos.

O ciclo intermitente de secagem e umidificação é a condição mais desfavorável para a estrutura do concreto armado, uma vez que acelera consideravelmente a entrada de cloreto (ZHANG e SHAO, 2016; YE et al., 2016). Durante um período de umedecimento, a água do mar contendo íons cloreto penetra no concreto por sucção capilar, até uma profundidade considerável, enquanto no período de secagem seguinte a água evapora do concreto, deixando íons cloreto no interior do concreto, que se difundem em todas as direções do concreto. Como resultado desse processo, a difusão desses íons pode ocorrer numa velocidade relativamente alta (SIMCIC et al., 2015).

Portanto, todos os corpos de prova foram expostos à um ambiente propenso à carbonatação durante três meses, que nesse caso foi um estacionamento subterrâneo de um edifício residencial, devido a uma maior concentração de CO₂ presente na atmosfera e a pouca ventilação. Os corpos de prova que não foram curados foram expostos à carbonatação logo após a desmoldagem, já os que foram curados foram expostos logo após a cura úmida. Nesse período os corpos de prova ficaram em um recipiente coberto com uma tela para evitar o contato com agentes externos que pudessem interferir no

resultado. Em seguida foi induzida a penetração de íons de cloreto por seis semiciclos de secagem e imersão em solução salina, cada um correspondendo a 5 dias em estufa a 50°C e a imersão parcial em uma solução de 5% NaCl, com duração de 2 dias. Apesar da água do mar possuir um teor de cloretos na ordem de 3,5% decidiu-se utilizar um valor maior (5%) devido ao curto espaço de tempo para a realização do ensaio (CARDOSO, 2016).

2.5 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

A permeabilidade dos corpos de prova foi avaliada pelo ensaio de absorção por capilaridade, baseando-se na NBR 9779 (ABNT, 2012). A absorção por capilaridade é importante devido a indução da penetração de íons de cloreto por semiciclos de secagem e imersão em solução salina, onde a mesma atuou por imersão parcial, sendo a capilaridade um fenômeno importante na difusão dos íons de cloreto. Para tal ensaio foram utilizados 3 corpos de prova de cada série (C-1, C-2, C-3 e C-4).

2.6 RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA

A resistência dos corpos de prova à tração também foi determinada. Os corpos de prova foram rompidos diametralmente em uma prensa hidráulica, seguindo a norma NBR 7222 (ABNT, 2011), de forma que ao final do rompimento o corpo de prova foi dividido no meio em duas partes iguais. O rompimento se deu após o período de carbonatação e dos semiciclos em solução salina. Ao todo foram rompidos 6 corpos de prova de cada série (C-1, C-2, C-3 e C-4). Escolheu-se esse método pois posteriormente os corpos de prova rompidos foram utilizados para os ensaios de carbonatação e de cloretos, onde em uma das metades foi aspergido solução de fenolftaleína, para a determinação da profundidade de carbonatação, e na outra foi aspergido nitrato de prata, para determinação da profundidade dos íons de cloreto.

2.7 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

A verificação da profundidade de carbonatação foi feita pela aspensão da solução de fenolftaleína, com base na CPC-18 (RILEM, 1988). A fenolftaleína tem a faixa de pH compreendida entre 8,3 e 10 para a mudança de cor, ficando vermelho-carmim quando está acima (indicando um concreto não carbonatado) e incolor quando está abaixo da faixa (indicando um concreto carbonatado).

A aspensão da fenolftaleína foi feita após o rompimento dos corpos de prova à tração por compressão diametral em uma prensa hidráulica, visando a divisão dos corpos

de prova ao meio, expondo a sua face interna onde foi borrifada a solução com o indicador. Foram utilizados para esse ensaio seis metades dos corpos de prova de cada série (C-1, C-2, C-3 e C-4), onde foram medidas a espessuras da frente de carbonatação.

A penetração e o transporte de agentes agressivos no concreto, como o CO₂ e os íons de cloreto, através da sua rede de poros podem ser analisados através do modelo simplificado da Primeira Lei de Fick, que é amplamente utilizada como base para lidar com problemas de durabilidade das estruturas. Tal simplificação foi denominada de modelo da raiz quadrada do tempo, que é traduzido pela Equação 2 mostrada abaixo (CARDOSO, 2016; YI et al., 2019).

$$X = k\sqrt{t} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

- x = profundidade de carbonatação em centímetros;
- k = coeficiente de carbonatação (cm²/ano);
- t = tempo em anos.

O valor de k depende de diversos fatores, como a difusibilidade, a concentração de CO₂, a reserva alcalina, a condição de exposição da estrutura, o meio ambiente, entre outros, não sendo possível determiná-lo para estruturas recém-construídas (CARDOSO, 2016). Por isso, para esse trabalho, emprega-se a Equação 2 para prever o tempo necessário ao qual a frente de carbonatação atinja as armaduras, ou seja, a vida útil, encontrando o valor de k por simples substituição e considerando os valores de profundidade determinados através da aspersão de fenolftaleína.

2.8 ENSAIO DE CLORETOS

A presença de cloretos livres foi avaliada através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata, de acordo com a norma italiana UNI 7928 (ITALIAN STANDARD, 1978). A aspersão da solução de nitrato de prata em presença de cloretos livres gera o cloreto de prata de coloração clara e na ausência de cloretos livres, o óxido de prata, que possui uma coloração marrom.

A aspersão do nitrato de prata também foi feita após o rompimento dos corpos de prova à tração por compressão diametral em uma prensa hidráulica. Para esse ensaio foram utilizados as outras metades dos corpos de prova rompidos, ou seja, 6 metades dos corpos de prova de cada série (C-1, C-2, C-3 e C-4), onde foram medidas as profundidades dos íons de cloreto.

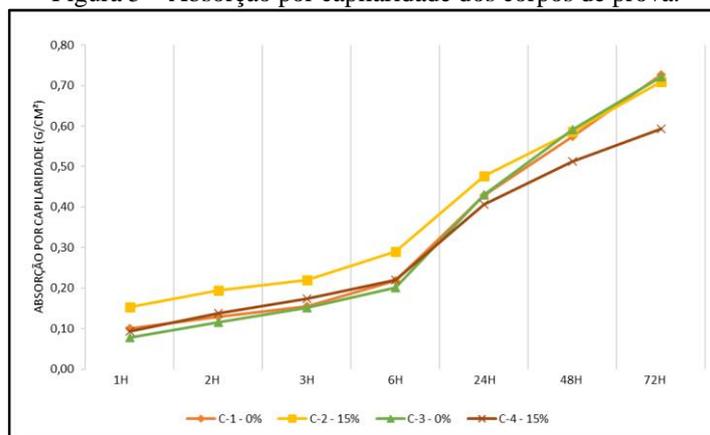
Também foi utilizado o modelo simplificado da Primeira Lei de Fick para avaliar o tempo necessário ao qual a profundidade dos íons de cloreto atinja as armaduras, considerando os valores de profundidades determinados durante a aspersão de nitrato de prata.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Na Figura 5 e na Tabela 4 é possível observar os resultados do ensaio de absorção por capilaridade. Os valores apresentados representam a média dos resultados individuais de cada série. Pode-se analisar que a série com maior absorção ao final do ensaio (72h) foram os corpos de prova C-1, ou seja, com 0% de CBCA e que não foram curados, com uma absorção de 0,73 g/cm². Já os com menor absorção capilar foram os corpos de prova C-4 que possuem 15% de CBCA em substituição ao cimento e que foram curados, com absorção de 0,59 g/cm².

Figura 5 – Absorção por capilaridade dos corpos de prova.



Fonte – Autor.

Tabela 4 – Resultado do ensaio de absorção por capilaridade.

SÉRIES	ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE (g/cm ²)						
	1h	2h	3h	6h	24h	48h	72h
C-1	0,10	0,13	0,16	0,22	0,43	0,57	0,73
C-2	0,15	0,19	0,22	0,29	0,48	0,59	0,71
C-3	0,08	0,12	0,15	0,20	0,43	0,59	0,72
C-4	0,09	0,14	0,17	0,22	0,41	0,51	0,59

Fonte – Autor.

Analisando os resultados, pode-se observar que a substituição do cimento pela CBCA causou, nos primeiros períodos do ensaio, um aumento da absorção para C-2 e C-4 quando comparado aos corpos de prova sem a cinza, C-1 e C-3. Porém, nos últimos períodos tal resultado se inverteu e ocorreu uma redução na absorção por capilaridade

para os corpos de prova com CBCA, tanto para os corpos de prova que foram curados como os que não foram. Essa redução foi de 2,74% para C-2 em relação à C-1, e de 18,06% para C-4 em relação a C-3.

Podemos analisar também, através dos resultados obtidos, que o processo de cura conseguiu reduzir a permeabilidade dos corpos de prova. Para as séries sem CBCA a cura proporcionou uma redução de permeabilidade de apenas 1,37%, de C-3 em relação à C-1. Já para as séries com adição da CBCA essa redução da permeabilidade foi de 16,90% de C-4 em relação à C-2.

Esse resultado mostra que a utilização da cinza causou uma redução da absorção por capilaridade nos corpos de prova, o que contribui para a redução de entrada de agentes agressivos no concreto. Além disso, pode-se perceber que a utilização da CBCA aliada à cura propiciou o melhor resultado, evidenciando a importância do processo da cura para que a reação pozolânica aconteça em sua plenitude, diminuindo a permeabilidade do concreto.

Os resultados encontrados confirmam o que foi afirmado por Sampaio et al. (2014), de que há a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça por completo ao se utilizar adições de cinza volante. Ele determinou que a incorporação da CBCA no concreto promove a diminuição da porosidade total do sistema pelo efeito filler, devido ao preenchimento dos vazios pelas partículas finas da cinza. Outro fator que contribui para a diminuição da porosidade do concreto, aumentando a tortuosidade dos canais e reduzindo a interconectividade dos poros, é a reação entre a sílica presente nas cinzas com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) do cimento formando estruturas do tipo C-S-H.

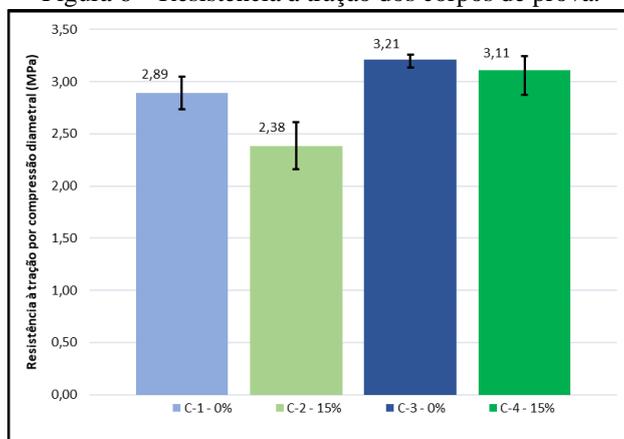
Medeiros et al. (2017), Lima et al. (2011) e Simcic et al. (2015) também encontraram que a utilização de cinzas volantes e pozolanas em substituição ao cimento levam a uma menor permeabilidade e teores de vazios em comparação ao concreto que não as possuíam em sua composição. Esse fator foi de fundamental importância para barrar a entrada de agentes agressores no concreto.

3.2 RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA

A seguir, na Figura 6, é apresentado os resultados do ensaio de resistência a tração por compressão diametral. Os valores apresentados representam a média dos resultados individuais de cada série. Nota-se que os corpos de prova da série C-3, sem utilização de CBCA e que foram curados, apresentam o maior valor de resistência à tração, com 3,21

MPa. Já os corpos de prova C-2, com utilização de 15% CBCA e que não foram curados, apresentam o menor valor de resistência à tração, de 2,38 Mpa.

Figura 6 – Resistência à tração dos corpos de prova.



Fonte – Autor.

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que a substituição parcial do cimento pela CBCA causou uma queda nos valores de resistência quando comparado aos corpos de prova sem a cinza. Para as séries não curadas, a redução de resistência devido ao uso da cinza em C-2 foi de 17,65% em comparação com C-1. Já para as séries curadas essa redução devido ao uso da CBCA foi significativamente menor, C-4 teve uma queda de resistência de apenas 3,12% quando comparado com C-3, o que não representa uma diferença considerável de resistência. Esse resultado mostra que concretos com substituição de cimento por CBCA e que passaram por um processo adequado de cura apresentam resistências semelhantes ao concreto comum.

Além disso, pode-se observar que o processo de cura contribuiu significativamente para o aumento da resistência à tração. Para os corpos de prova sem utilização de CBCA, a cura propiciou um aumento de 11,07% para o C-3 em relação à C-1. Já para os corpos de prova com uso da CBCA esse aumento foi de 30,67% para C-4 em relação a C-2.

Em seu estudo Sampaio et al. (2014) determinaram que a incorporação de CBCA no concreto contribuiu para a diminuição da porosidade total, da absorção e do índice de vazios do concreto devido ao efeito filler, o que favoreceu consequentemente o aumento da sua resistência. Os resultados ainda mostraram que algumas amostras de concreto com CBCA em sua composição e que passaram por um período curto de cura, de apenas 7 dias, apresentaram uma menor resistência em comparação aos concretos sem CBCA o

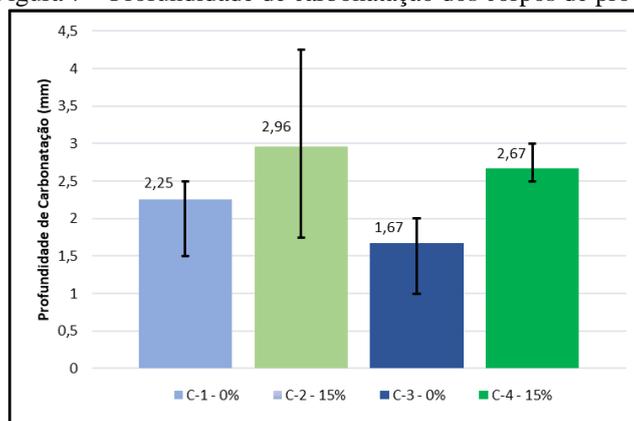
que pode ter sido reflexo de uma hidratação lenta dos constituintes da CBCA com o cimento Portland, confirmando novamente a importância do processo de cura adequado.

Cordeiro et al. (2010) em seu trabalho estudaram a influência do tempo de cura na resistência do concreto com substituição parcial do cimento por CBCA. Ele concluiu que quanto maior for o período de cura, maior serão as resistências, tanto para concretos com como para concretos sem a CBCA. O período de cura contribuiu consideravelmente para o aumento de resistência dos concretos com CBCA, no início, com 7 dias de cura, apenas os concretos com 10% de CBCA possuíam uma resistência um pouco maior, porém ao final do estudo, com 180 dias de cura, os concretos com CBCA possuíam resistência superior ou igual ao concreto sem a cinza em sua composição.

3.3 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

A Figura 7 abaixo mostra os resultados do ensaio de determinação da profundidade da frente de carbonatação. Os valores apresentados representam a média dos resultados individuais de cada série. Pode-se observar que a série C-2, que possui 15% de CBCA e que não passou pelo processo de cura, apresenta a maior profundidade, que foi de 2,96 mm. Já a série C-3, que não possui CBCA e que passou pelo processo de cura, foi a que apresentou a menor profundidade, que foi de 1,67mm.

Figura 7 – Profundidade de carbonatação dos corpos de prova.



Fonte – Autor.

Pode-se analisar também os resultados encontrados nesse ensaio através do modelo simplificado da Primeira Lei de Fick, explicado anteriormente. Para tal, encontra-se o valor de k através da substituição simples da profundidade de carbonatação determinada e do tempo em anos ao qual os corpos de prova foram expostos a sua ação. Foi tomado como base o valor de cobertura nominal de 40 mm, correspondente à classe

de agressividade ambiental III, de agressividade forte, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Com isso pode-se encontrar o tempo em anos necessário para que a frente de carbonatação atinja as armaduras para as quatro séries, cujo resultado se encontra na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Tempo para que a frente de carbonatação atinja as armaduras.

Séries	Profundidade (cm)	Tempo do ensaio (anos)	K (cm ² /ano)	Cobrimento (cm)	Tempo final (ano)
C-1	0,225	0,2473	0,4525	4,00	78
C-2	0,296	0,2473	0,5953	4,00	45
C-3	0,167	0,2473	0,3359	4,00	142
C-4	0,267	0,2473	0,5370	4,00	55

Fonte – Autor.

A partir dos resultados obtidos nesse ensaio pode-se compreender que a utilização da CBCA potencializou o avanço da frente de carbonatação em relação aos corpos de prova que não possuíam a cinza na sua composição. Para as séries não curadas, a utilização da cinza causou um aumento de 31,55% na espessura da frente de carbonatação de C-2 em comparação a C-1, o que se traduz numa redução de 33 anos da vida útil, segundo a Primeira Lei de Fick. Já para as séries curadas esse aumento foi de 59,88% de C-4 em relação à C-3, correspondendo a uma redução de 87 anos da vida útil. Zhang e Shao (2016), Wang et al. (2017), Medeiros et al. (2017) e Lima et al. (2011) também encontraram resultados semelhantes em suas pesquisas, onde a presença de cinzas volantes aumentaram significativamente a profundidade de carbonatação.

O uso das cinzas volantes como substituição parcial tende a reduzir a reserva alcalina e isso explica a tendência de aumento da profundidade de carbonatação nos corpos de prova. Na atuação de uma pozolana existem efeitos contrários em termos de carbonatação: por um lado ela causa o refinamento dos poros e a redução da sua interconectividade, o que impede a entrada de agentes agressores; por outro lado ocorre a redução da reserva alcalina (MEDEIROS et al., 2017). No uso da CBCA como substituição nesse estudo, o efeito da redução da reserva alcalina foi predominante.

Outra análise que se pode tirar dos resultados obtidos é que o processo de cura conseguiu reduzir o avanço da carbonatação, o que pode ser atribuído a redução da permeabilidade dos corpos de prova devido à cura. Para os corpos de prova sem utilização da CBCA essa redução foi de 25,78% na espessura da frente de carbonatação de C-3 em relação à C-1, que se traduz num ganho de 64 anos de vida útil. Já para os corpos de prova

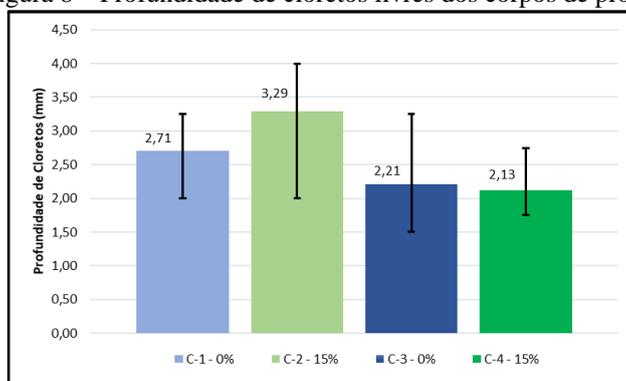
com uso da cinza essa redução foi de 9,80% de C-4 em relação à C-2, correspondendo a um ganho de 10 anos de vida útil.

No estudo realizado por Zhang e Shao (2016), o processo de cura durante 27 dias também conseguiu reduzir a profundidade da frente de carbonatação tanto para o concreto sem substituição de cimento por cinza volante como para o concreto com substituição, onde a profundidade de carbonatação acabou sendo de zero para os dois casos. O processo de cura permitiu que os grãos de cimento que não foram reagidos fossem capazes de ser mais hidratados na condição úmida, sendo que os produtos da reidratação subsequente foram os responsáveis pela alcalinidade recuperada.

3.4 ENSAIO DE CLORETOS

A Figura 8 abaixo mostra o resultado do ensaio de determinação da profundidade dos íons de cloreto livre. Os valores apresentados representam a média dos resultados individuais de cada série. Pode-se observar que a série C-2, com utilização de 15% CBCA e que não foram curados, apresenta a maior profundidade, que foi de 3,29 mm. Já a série C-4, com utilização de 15% CBCA e que foram curados, apresenta a menor profundidade, que foi de 2,13 mm.

Figura 8 – Profundidade de cloretos livres dos corpos de prova.



Fonte – Autor.

Também analisou-se os resultados encontrados nesse ensaio através do modelo simplificado da Primeira Lei de Fick. Foi tomado como base o valor de cobrimento nominal de 40 mm, correspondente à classe de agressividade ambiental III, de agressividade forte, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Com isso podemos encontrar o tempo em anos necessário para que a frente de cloretos livres atinja as armaduras para as quatro séries, cujo resultado se encontra na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Tempo para que a frente de íons de cloreto atinja as armaduras.

Séries	Profundidade (cm)	Tempo do ensaio (anos)	K (cm ² /ano)	Cobrimento (cm)	Tempo final (ano)
C-1	0,271	0,2473	0,5450	4,00	54
C-2	0,329	0,2473	0,6616	4,00	37
C-3	0,221	0,2473	0,4444	4,00	81
C-4	0,213	0,2473	0,4284	4,00	87

Fonte – Autor.

Analisando os resultados pode-se observar que a utilização da CBCA potencializou o avanço da profundidade de cloretos para as séries que não foram curadas, porém, para as séries que foram curadas, a utilização da cinza diminuiu esse avanço. Para os corpos de prova que não passaram pelo processo de cura, a utilização da CBCA causou um aumento de 21,40% no avanço da profundidade dos cloretos de C-2 em relação à C-1, o que corresponde a uma redução de 17 anos na vida útil, de acordo com a Primeira Lei de Fick. Já para os que foram curados houve uma redução de 3,62% do avanço da profundidade de C-4 em relação à C-3, correspondendo a um aumento de 6 anos de vida útil.

Pode-se analisar também que o processo de cura conseguiu reduzir a profundidade dos cloretos livres tanto para as séries com, como para as séries sem utilização da CBCA. Em relação às séries sem uso da cinza, houve uma redução de 18,45% da profundidade de cloretos de C-3 em relação à C-1, o que se traduz num aumento da vida útil de 27 anos. Já para as que possuíam a cinza em sua composição essa redução foi de 35,26% de C-4 em relação a C-2, correspondendo a um aumento de 50 anos de vida útil.

Liu et al. (2017), Zhang e Shao (2016), Kuosa et al. (2013), Ye et al. (2016) e Malheiro et al. (2015) também encontraram resultados semelhantes em suas pesquisas, onde a carbonatação aumentou significativamente a profundidade de cloretos livres na matriz cimentícia, sendo esse efeito mais grave com a presença de cinzas volantes. Ficou claro que, além da redução da alcalinidade da solução porosa, a carbonatação poderia agravar a penetração de cloreto e aumentar o risco de corrosão das armaduras (ZHANG E SHAO, 2016). No presente estudo o efeito do agravamento foi maior para os corpos de prova que não passaram pelo processo de cura e que possuíam CBCA em sua composição.

Este resultado demonstra que a capacidade de ligação do cloreto é reduzida pela reação de carbonatação, resultando no aumento da concentração de íons cloreto em torno da barra de aço incorporada nas estruturas de concreto. Como já explicado, nos concretos, os produtos de hidratação podem reagir com íons cloreto formando o sal de Friedel, o que é um aspecto benéfico para retardar a penetração do cloreto, já que nesse caso ele está

fixo. No entanto, a carbonatação pode consumir os produtos de hidratação do cimento, o que enfraquece a ligação dos cloretos. Além disso, também foi mencionado que a carbonatação é capaz de dissolver os sais de Friedel e liberar os íons cloreto que antes se encontravam fixos. Devido a esses mecanismos químicos, a capacidade de ligação ao cloreto é seriamente reduzida pelo efeito acoplado da carbonatação e do ataque de cloretos (LIU et al., 2017).

Já Liu et al. (2016) em sua pesquisa determinaram que a utilização de cinzas em substituição ao cimento, cujo corpos de prova também foram curados durante 28 dias e foram expostos a ação conjunta da carbonatação e do ataque por cloretos, conseguiu diminuir os teores de cloretos livres com a profundidade, sendo que essa diminuição foi tanto maior quanto maior a porcentagem de cinza volante utilizada. Ele concluiu que o efeito acoplado da carbonatação e da entrada de íons de cloreto pode densificar a microestrutura e aumentar a proporção de pequenos poros de concreto com cinzas volantes, em comparação com o efeito único da carbonatação ou da entrada de aerossóis de cloretos.

4 CONCLUSÕES

Ao final das discussões realizadas pode-se concluir que a série C-4, que possuíam CBCA como substituição parcial do cimento e que estava aliada ao processo de cura, foi a série que apresentou um melhor desempenho na maioria dos ensaios. Essa série apresentou um melhor resultado na redução da absorção por capilaridade e na profundidade da frente de íons de cloretos livres, além de não reduzirem consideravelmente a sua resistência. O único resultado onde o desempenho da CBCA não foi favorável, foi referente a profundidade de carbonatação, sendo maior nos corpos de prova que não possuíam a cinza em sua composição. Desse modo, pode-se concluir que:

- a) A utilização da CBCA conseguiu reduzir a absorção por capilaridade nos corpos de prova, sendo significativamente maior quando a utilização da cinza estava aliada ao processo de cura;
- b) A utilização da CBCA reduziu a resistência para os corpos de prova que não passaram pelo processo de cura. Porém, a redução da resistência devido à utilização da cinza aliada ao processo de cura foi relativamente menor, não representando uma diferença considerável no valor de resistência;
- c) O uso da CBCA aumentou a profundidade da frente de carbonatação, tanto para as séries que passaram pelo processo de cura como para as que não passaram;

- d) A profundidade dos íons de cloreto livres aumentou com a utilização da CBCA para as séries que não passaram pelo processo de cura. No entanto, para as séries que passaram pelo processo de cura, o uso da CBCA conseguiu reduzir a profundidade dos íons de cloreto, o que pode ser atribuído a redução da permeabilidade dos corpos de prova dessa série.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

NBR 14656: Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

CARDOSO, A. S. **Análise da capacidade de proteção do cimento com adição de Metacaulim e Sílica Ativa sob ação de CO₂ e íons de cloreto**. 2016. 113 f. Tese (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2016.

CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R.D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 269-275, Nov. 2016.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine sugar cane bagasse ash high potential pozzolanic material for tropical countries. **IBRACON Structures and Materials**, v. 3, n. 1, p. 50-67, Mar. 2010.

FERNANDES, S. E.; TASHIMA, M. M.; MORAES, J. C. B.; ISTUQUE, D. B.; FIORITI, C. F.; MELGES, J. L. P.; AKASAKI, J. L. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Revista Matéria**, v.20, n.4, p. 909–923, 2015.

ITALIAN STANDARD. **UNI 7928**: Determination of chloride ion penetration. Roma, Italia. 1978.

JIN, M.; GAO, S.; JIANG, L.; CHU, H.; LU, M.; ZHI, F. F. Degradation of concrete with addition of mineral admixture due to free chloride ion penetration under the effect of carbonation. **Corrosion Science**, v. 138, p. 42-53, Abr. 2018.

KUOSA, H.; FERREIRA, R. M.; HOLT, E.; LEIVO, M.; VESIKARI, E. Effect of coupled deterioration by freeze–thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. **Cement and Concrete Composites**, v.47, p. 32-40, Out. 2013.

LI, K.; ZHAO, F.; ZHANG, Y. Influence of carbonation on the chloride ingress into concrete: Theoretical analysis and application to durability design. **Cement and Concrete Research**, v. 123, Set. 2019.

LIMA, S. A.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; MORETTI, J. P.; PORTELLA, K. F. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, pp. 201-212, Abr./Jun. 2011

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; WANG, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y. Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress. **Corrosion Science**, v. 112, p. 364-372, Ago. 2016.

LIU, J.; QIU, Q.; CHEN, X.; XING, F.; HAN, N.; HE, Y.; MA, Y. Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. **Corrosion Science**, v. 95, p. 217-225, Mar. 2017.

MALHEIRO, R.; CAMÕES, A.; MEIRA, G.; FERREIRA, R. M.; AMORIM, M. T.; REIS, R. O papel das cinzas volantes no ingresso de cloretos face à ação combinada entre carbonatação e dos iões cloreto. In: COMPAT, Lisboa, Set. 2015.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; FILHO, J. H. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, pp. 125-139, Out./Dez. 2017.
RILEM RECOMMENDATIONS. **CPC-18**: Measurement of hardened concrete carbonation depth. 1988. p. 453-455.

SAMPAIO, Z. L. M. Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Analysis of the influence of the sugar cane bagasse ashes on mechanical behavior of concrete. **IBRACON Structures and Materials**, v. 7, n. 4, p. 626-647, Ago. 2014.

SANTOS, J. V.; NAHIME, B. O.; SANTOS, I. S.; BASILEIRO, K. P. T. V.; KUNAN, P. M.; LOBO, F. A. Efeitos da adição e substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em matrizes cimentícias. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba. v. 6, n. 10, p. 77494- 77509, out. 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-250>

SIMCIC, T.; PEJOVNIK, S.; SCHUTTER, G. D.; BOSILJKOV, V. B. Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting–drying cycles. **Corrosion Science**, v. 93, p. 1216-1223, Mai. 2015.

WANG, Y.; NANUKUTTAN, S.; BAI, Y.; BASHEER, P.A.M. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 173-183, Mar. 2017.

XIE, X.; FENG, Q.; CHEN, Z.; JIANG, L.; LU, W. Diffusion and distribution of chloride ions in carbonated concrete with fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 119-125, Mai. 2019.

YE, H.; JIN, X.; FU, C.; JIN, N.; XU, Y.; HUANG, T. Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 457-463, Mar. 2016.

YI, C.; CHEN, Z.; BINDIGANAVILE, V. Crack growth prediction of cement-based systems subjected to two-dimensional sulphate attack. **Construction and Building Materials**, v. 222, pp. 814-828, Jul. 2019.

ZHANG, D.; SHAO, Y. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 123, pp. 516-526, Jul. 2016.

ZHU, X.; ZI, G.; CAO, Z.; CHENG, X. Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 110, pp. 369-380, Fev. 2016a.

ZHU, X.; ZI, G.; LEE, W.; KIM, S.; KONG, J. Probabilistic analysis of reinforcement corrosion due to the combined action of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, pp. 667-680, Ago. 2016b.